

**Luciano Dionisio Dantas**

**Proposta de Modelo de Dinâmica de Filas para Tráfego  
Veicular Urbano**

**FLORIANÓPOLIS, 04 de Dezembro  
2005**

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA**

**PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO  
EM ENGENHARIA ELÉTRICA**

**Proposta de Modelo de Dinâmica de Filas para Tráfego  
Veicular Urbano**

Dissertação submetida à  
Universidade Federal de Santa Catarina  
como parte dos requisitos para a  
obtenção do grau de Mestre em Engenharia Elétrica.

**Luciano Dionisio Dantas**

Florianópolis, 04 de Dezembro de 2005

# **Proposta de Modelo de Dinâmica de Filas para Tráfego Veicular Urbano**

Luciano Dionisio Dantas

‘Esta Dissertação foi julgada adequada para a obtenção do título de Mestre (Doutor) em Engenharia Elétrica, Área de Concentração em *Controle, Automação e Informática Industrial*, e aprovada em sua forma final pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Santa Catarina.’

---

Werner Kraus Junior, PhD  
Orientador

---

Alexandre Trofino Neto, Dr.  
Coordenador do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica

Banca Examinadora:

---

Werner Kraus Jr., PhD  
Presidente

---

Edson Roberto de Pieri, Dr.

---

Eduardo Camponogara, PhD

---

José Eduardo Ribeiro Cury, Dr.d’Etat

## **AGRADECIMENTOS**

Agradeço ao meu orientador Werner Kraus Jr. e a todos meus colegas, Rodrigo Carlson, Flávio Cuareli, João Paulo Souza, entre outros, pelo apoio e companhia durante este período.

Agradeço também à minha família por me incentivar sempre a conquistar meus objetivos.

Resumo da Dissertação apresentada à UFSC como parte dos requisitos necessários para obtenção do grau de Mestre em Engenharia Elétrica.

## **Proposta de Modelo de Dinâmica de Filas para Tráfego Veicular Urbano**

**Luciano Dionisio Dantas**

Dezembro/2005

Orientador: Werner Kraus Junior, PhD

Área de Concentração: Controle, Automação e Informática Industrial

Número de Páginas: 82

Apresenta-se neste trabalho um estudo sobre estimação de filas em tráfego urbano. Inicialmente, revisa-se alguns conceitos de tráfego úteis ao entendimento do problema e apresenta-se de maneira concisa alguns dos modelos de dinâmica de filas existentes juntamente com alguns dos sistemas de controle em tempo real que utilizam estes modelos. A partir deste estudo, é feita uma proposta de modelo de dinâmica de filas horizontais que permite descrever o atraso veicular e a posição do final da fila em uma via dotada de um detector veicular. O modelo proposto é testado em duas configurações, uma delas com apenas um detector veicular na entrada da via, e outra com dois detectores veiculares, um na entrada e outro na saída da via. Os resultados mostram a viabilidade do modelo para a segunda configuração citada.

Abstract of Dissertation presented to UFSC as a partial fulfillment of the requirements for the degree of Master of Science in Electrical Engineering.

## **Queue Dynamics Model Proposal for Vehicular Urban Traffic**

**Luciano Dionisio Dantas**

December/2005

Advisor: Werner Kraus Junior, PhD

Area of Concentration: Control, Automation and Industrial Informatics

Number of Pages: 82

A study about traffic queue estimation in urban traffic is presented. Initially, traffic flow concepts related to the stated problems are revised. Also, a concise presentation of dynamic models for traffic queues together with traffic control systems that employ such models is carried out. From this study, a model for the dynamics of horizontal traffic queues is proposed. Its main features are the description of vehicular delay and the position of the queue tail in a roadway portion equipped with vehicle detector. The proposed model is tested in two configurations, one of which having one detector in the entrance of the road link and another one with an extra detector at the link exits. Simulation results show the adequacy of the second configuration considered for the estimation problem.

# Sumário

<b>1</b>	<b>Introdução</b>	<b>1</b>
1.1	Descrição do Problema . . . . .	1
1.2	Estimação de Filas no Controle de Tráfego . . . . .	2
1.3	Objetivo do Trabalho . . . . .	3
1.4	Estrutura do Texto . . . . .	3
<b>2</b>	<b>Conceitos Básicos</b>	<b>6</b>
2.1	Caracterização do Fluxo Veicular: Analogia com Dinâmica de Fluidos . . . . .	6
2.2	Semaforização no Tráfego . . . . .	10
2.3	Formação e Descarga de Filas . . . . .	12
2.4	Conclusão . . . . .	14
<b>3</b>	<b>Contexto: Controle de Tráfego em Tempo Real</b>	<b>18</b>
3.1	Sistemas de Controle . . . . .	18
3.1.1	Brecha Máxima . . . . .	18
3.1.2	SCOOT - <i>Split Cycle Offset Optimization Technique</i> . . . . .	19
3.1.3	Modelos de Horizonte Deslizante . . . . .	23
3.1.4	TUC - <i>Traffic-responsive Urban Control</i> . . . . .	29
3.2	Conclusão . . . . .	30

<b>4</b>	<b>Modelos de Estimação de Filas</b>	<b>31</b>
4.1	Introdução . . . . .	31
4.2	SCOOT . . . . .	31
4.3	PRODYN . . . . .	34
4.4	Modelo de Fila Horizontal . . . . .	37
4.5	TUC . . . . .	40
4.6	Conclusão . . . . .	42
<b>5</b>	<b>Modelo Proposto</b>	<b>45</b>
5.1	Introdução . . . . .	45
5.2	Proposta . . . . .	46
5.3	Análise para Manutenção de Duas Filas . . . . .	50
5.4	Conclusão . . . . .	51
<b>6</b>	<b>Implementações e Resultados</b>	<b>58</b>
6.1	Implementação . . . . .	58
6.2	Resultados de Simulação . . . . .	63
6.2.1	Malha 1 . . . . .	64
6.2.2	Malha 2 . . . . .	66
6.3	Conclusão . . . . .	69
<b>7</b>	<b>Conclusões e Perspectivas</b>	<b>71</b>
<b>A</b>	<b>Código fonte em linguagem Matlab</b>	<b>73</b>



# Lista de Figuras

1.1	Segmento de uma via com elementos que afetam a chegada/passagem de veículo em linha de retenção . . . . .	2
1.2	Filas Múltiplas . . . . .	5
2.1	Onda de choque . . . . .	7
2.2	Modelo de Greenshield para descrição da relação entre fluxo, velocidade e concentração em uma rodovia . . . . .	9
2.3	Ondas de Fluxo . . . . .	10
2.4	Curvas de Fluxo-Concentração para uma determinada via e um gargalo hipotético [14]	11
2.5	Cruzamento simples . . . . .	12
2.6	Temporização de um cruzamento simples . . . . .	15
2.7	Histograma da descarga de veículos durante um verde . . . . .	16
2.8	Formação e dissipação de uma fila hipotética . . . . .	17
3.1	Formação e dissipação de uma fila hipotética . . . . .	19
3.2	Arquitetura RHODES . . . . .	28
4.1	Equivalência entre o Modelo de Fila Vertical e o Modelo de Fila Horizontal . . . . .	32
4.2	Exemplo de detecção e correspondente contagem em LPU's . . . . .	32
4.3	Vega Profile . . . . .	35

4.4	Seções de uma via de acordo com o modelo do PRODYN [8] . . . . .	36
4.5	Dados de saída do detector . . . . .	37
4.6	Velocidade $\times$ tamanho da fila . . . . .	38
4.7	Onda de choque . . . . .	39
4.8	Relação de número médio de veículos e ocupação para diferentes posições no <i>link</i> [6]	43
4.9	Representação simplificada da relação entre a ocupação e o número de veículos para diferentes posições do detector [6] . . . . .	44
4.10	Família de curvas para $f_z(o_z)$ , sendo $l_z$ o comprimento total da via, e $o_z$ a ocupação [6]	44
5.1	Filas em vias sobre-saturadas . . . . .	52
5.2	Cenário 1 . . . . .	53
5.3	Cenário 2 . . . . .	53
5.4	Formação de múltiplas filas antes do cruzamento . . . . .	53
5.5	Formação de uma única fila secundária . . . . .	54
5.6	Gráficos do final e da frente da fila principal . . . . .	54
5.7	Evolução das filas; área em cinza representa o atraso total . . . . .	55
5.8	Quantificação do atraso no modelo de filas adotado . . . . .	55
5.9	Primeira Condição, formação da segunda fila . . . . .	55
5.10	Segunda Condição, manutenção de apenas duas filas . . . . .	56
5.11	Terceira Condição, formação da segunda fila . . . . .	56
5.12	Quarta Condição, manutenção de apenas duas filas . . . . .	57
6.1	Final e Frente da Fila Principal . . . . .	58
6.2	Vetor de chegadas $q_a$ . . . . .	60
6.3	Memória circular . . . . .	61

6.4	Ponteiros de controle . . . . .	62
6.5	Malha 1 - Cenário 1 - Número de veículos no <i>link</i> dado pelo Modelo Proposto . . . .	65
6.6	Malha 1 - Cenário 1 - Número de veículos no <i>link</i> dado pelo Sitra . . . . .	65
6.7	Malha 1 - Cenário 1 - Posição do final da fila principal <i>B</i> . . . . .	65
6.8	Detalhe aumentado da Figura 6.7 . . . . .	66
6.9	Malha 1 - Cenário 1 - Número de veículos no <i>link</i> dado pelo Modelo Proposto, com fluxo de saturação alterado para $0.6\text{veic}/s$ . . . . .	66
6.10	Malha 1 - Cenário 1 - Número de veículos no <i>link</i> dado pelo Sitra . . . . .	67
6.11	Malha 1 - Cenário 1 - Posição do final da fila principal <i>B</i> , com fluxo de saturação alterado para $0.6\text{veic}/s$ . . . . .	67
6.12	Malha 1 - Cenário 2 - Número de veículos no <i>link</i> dado pelo Modelo Proposto . . . .	67
6.13	Malha 1 - Cenário 2 - Número de veículos no <i>link</i> dado pelo Sitra . . . . .	68
6.14	Malha 1 - Cenário 2 - Posição do final da fila principal <i>B</i> . . . . .	68
6.15	Malha 2 - Cenário 1 - Número de veículos no <i>link</i> dado pelo Modelo Proposto . . . .	69
6.16	Malha 2 - Cenário 1 - Número de veículos no <i>link</i> dado pelo Sitra . . . . .	69
6.17	Malha 2 - Cenário 1 - Posição do final da fila principal <i>B</i> . . . . .	69
6.18	Malha 2 - Cenário 2 - Número de veículos no <i>link</i> dado pelo Modelo Proposto . . . .	70
6.19	Malha 2 - Cenário 2 - Número de veículos no <i>link</i> dado pelo Sitra . . . . .	70
6.20	Malha 2 - Cenário 2 - Posição do final da fila principal <i>B</i> . . . . .	70

# Lista de Tabelas

3.1	Características dos Otimizadores do Sistema SCOOT . . . . .	20
3.2	Links e seus respectivos Estágios . . . . .	21
3.3	Comparação de performance entre as alternativas . . . . .	21
3.4	Comparação entre os <i>Performance Indexes</i> dos Links [18] . . . . .	22
4.1	Histórico de fila e detecções hipotéticas do SCOOT [18] . . . . .	33
6.1	Cenários de Simulação . . . . .	64

# Capítulo 1

## Introdução

### 1.1 Descrição do Problema

O estudo de sistemas de tráfego veicular é bastante beneficiado pelo uso de modelos dinâmicos. Busca-se, em estudos nesta área, descrever o comportamento dos motoristas em reação às condições vigentes de tráfego (fluxos, geometria, sinalização), além da dinâmica do tráfego como um todo visando criar soluções para melhorar a operação dos sistemas viários.

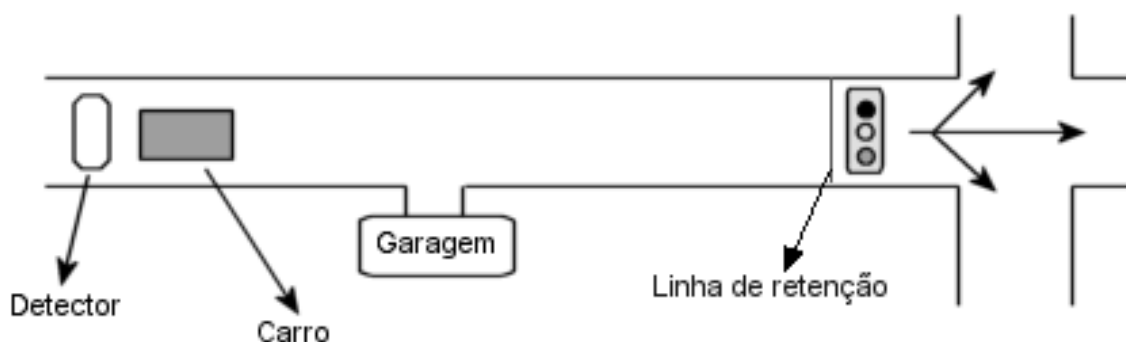
A característica do modelo deve ser tal, que permita, levando em conta os dados disponíveis da malha viária, a tomada de decisão que leve à eficiência do tráfego. Desta forma, dependendo do modelo adotado, em termos de complexidade e poder de descrição de fenômenos, pode-se ter variados graus de eficiência e eficácia.

Em particular, um sistema de Controle de Tráfego, baseia-se sobre um modelo de tráfego onde um dos dados vitais ao seu funcionamento está relacionado diretamente ao número e comportamento dos veículos presentes nas vias. Esses dados expressam a quantidade, a densidade ou a velocidade dos veículos, dependendo de como a informação é colhida ou utilizada, e são geralmente "traduzidos" em filas formadas [14, 24]. A informação a respeito das filas formadas é utilizada para o cálculo e previsão do atraso, que é uma das variáveis que se deseja minimizar em uma rede de transportes [25].

A estimação e predição de filas permite não só que o atraso seja estimado mas também que as condições da via como um todo sejam analisadas. A estimação refere-se à reconstituição da fila real e corrente através dos dados colhidos por sensores, os detectores veiculares. Já a predição, refere-se à projeção ou construção da fila em um futuro próximo, também baseada num modelo de tráfego e nos dados dos sensores, além de uma previsão de chegadas de veículos baseada em um histórico. A fila é

reconstituída através de um cálculo baseado na leitura dos dados provenientes de laços indutivos (os detectores veiculares) capazes de medir o número de carros e sua velocidade, nos parâmetros da via como fluxo de saturação e velocidade de cruzeiro, e na indicação semafórica [4].

Como motivação para caracterizar o problema de estimação pode-se refletir sobre o seguinte exemplo ilustrado na Figura 1.1. Imagine um veículo entrando em um trecho de rua semaforizado. Apesar do veículo ter sido detectado pelo laço indutivo presente na entrada da via, não se pode dizer com certeza se o mesmo irá entrar em alguma garagem ou estacionamento ou como irá reagir à fila presente, ou seja, se ele irá retardar a sua chegada ao final da mesma ou não. Mesmo num contexto determinístico, é preciso saber se a velocidade do veículo e as filas remanescentes implicarão em uma parada na linha de retenção ou não.



**Figura 1.1:** Segmento de uma via com elementos que afetam a chegada/passagem de veículo em linha de retenção

Devido a uma questão de custos, a instalação de detectores é priorizada às vias principais de acesso e saída da rede controlada, sendo que boa parte do interior da malha fica desprovido de dados correntes. Essa lacuna é preenchida com dados históricos provenientes de contagens e que além de representarem uma média, costumam ser desatualizados. Esses dados representam taxas de conversão e até mesmo fluxos, que variam com o tempo [17]. Observando a Figura 1.1 surge também a dúvida a respeito da direção tomada pelo veículo após cruzar a linha de parada. Por estarem sempre presentes, essas incertezas levam a erros de estimação que devem ser levados em consideração quando do projeto de alocação de sensores e da interpretação dos dados obtidos.

## 1.2 Estimação de Filas no Controle de Tráfego

Os sistemas de controle de tráfego abordam a fila de duas maneiras diferentes. Ela tanto pode ser vista como sendo o número de veículos presentes num determinado trecho, como também o

número de veículos parados nesse mesmo trecho [6, 10]. Ambos os conceitos estão relacionados, porém a forma de se analisar cada caso difere um pouco. Combinado a isso há também diferentes formas de se modelar a dinâmica das filas o que gera um gama de modelos de tráfego.

Apesar de todos os sistemas de controle de tráfego existentes se basearem em um modelo de tráfego, que nada mais é do que um modelo de dinâmica de filas, a maioria deles não enfatiza como é feita a detecção das filas, concentrando a discussão mais na lógica de controle e pressupondo conhecidas as filas. Isso ocorre porque o que se deseja destacar quando se apresenta um sistema desses é o que ele é capaz de fazer e como ele faz isso. Outra razão, seria o fato de não haver ainda um método preciso capaz de estimar e prever filas. Mesmo com os erros de estimação presentes, o ganho proporcionado pelos sistemas de controle atuados pelo tráfego é satisfatório, girando em torno de 10% [8, 18].

### 1.3 Objetivo do Trabalho

Este trabalho tem por objetivo propor um modelo de filas capaz de tratar o fenômeno das filas múltiplas, que não tem sido apropriadamente descrito na literatura. A fila, no presente trabalho, é caracterizada por um ou mais veículos parados numa determinada seção da via, e as filas múltiplas seriam aqueles blocos distintos de veículos parados num mesmo trecho da via. Tais filas são formadas quando o tempo de verde é insuficiente para servir a demanda e resulta num saldo de veículos após o término do tempo de verde. Observando-se a Figura 1.2, na última sequência, pode-se identificar dois blocos de veículos parados caracterizando as filas múltiplas. O tratamento das filas múltiplas é muito útil pois fornece uma informação mais precisa a respeito do estado do tráfego.

Além do modelo, propõe-se investigar as condições sob as quais o fenômeno ocorre, com vistas a contribuir com o projeto de sistemas de controle atuados pelo tráfego.

### 1.4 Estrutura do Texto

**Capítulo 2** Neste capítulo são revisados alguns conceitos básicos de tráfego que serão utilizados ao longo do trabalho e que possibilitam um melhor entendimento da dinâmica do tráfego e de forma a embasar as idéias apresentadas nos capítulos subseqüentes.

**Capítulo 3** Aqui são apresentados alguns dos sistemas de controle de tráfego mais conhecidos. Como uma das bases de funcionamento de um sistema desses é o modelo de dinâmica de filas, considerou-se relevante apresentar o modo de funcionamento deles.

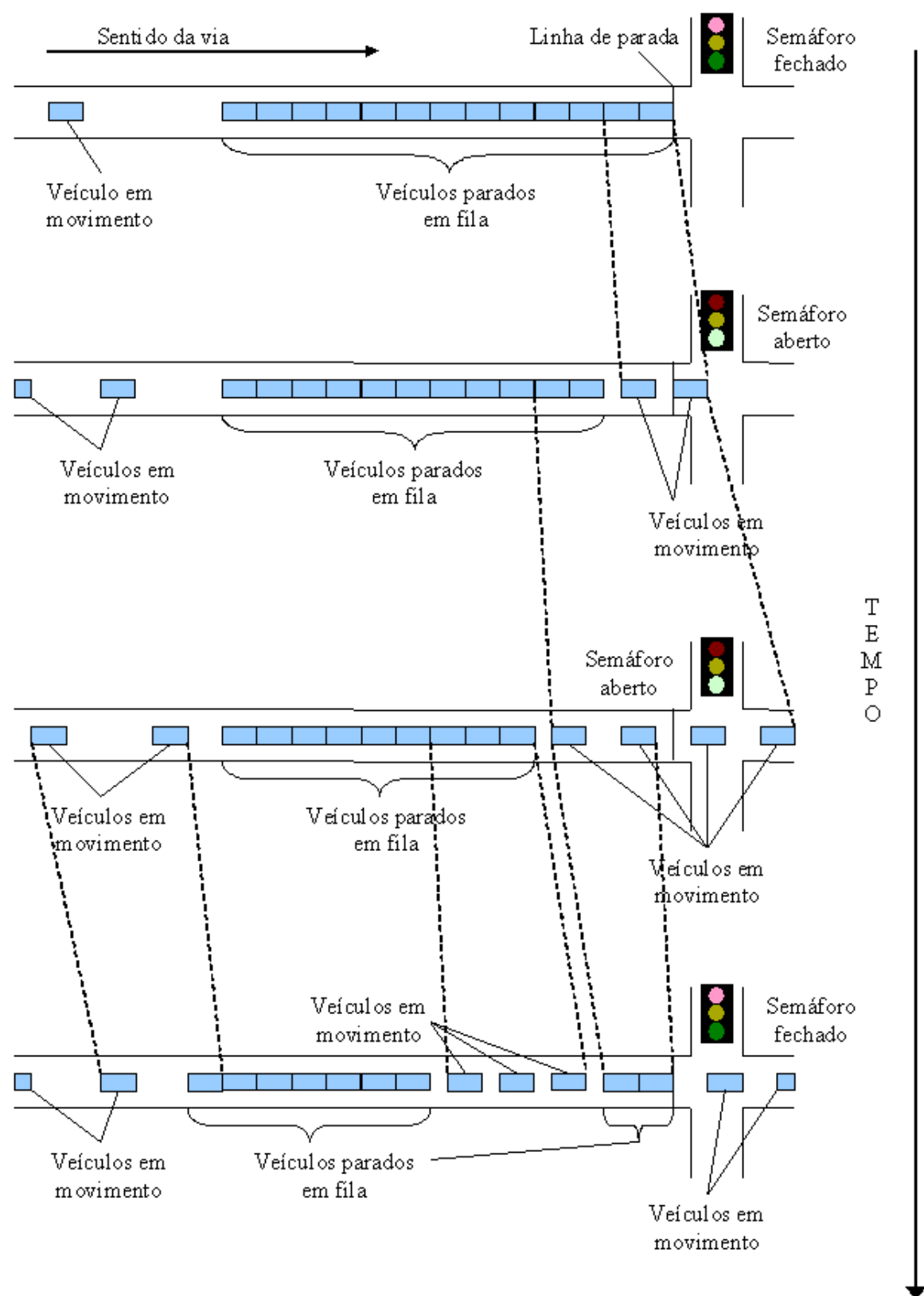
**Capítulo 4** Após apresentar alguns dos sistemas de controle de tráfego existentes, é feito um detalhamento dos modelos de dinâmica de filas utilizados por alguns deles além de outros estudos.

**Capítulo 5** Este capítulo é inteiramente dedicado à apresentação do modelo proposto, objetivo principal desta dissertação.

**Capítulo 6** Apresentado o modelo, alguns detalhes da implementação são ilustrados assim como os resultados obtidos.

**Capítulo 7** Neste último capítulo são apresentadas as conclusões e perspectivas de continuidade do estudo.





**Figura 1.2:** *Filas Múltiplas*

## Capítulo 2

# Conceitos Básicos

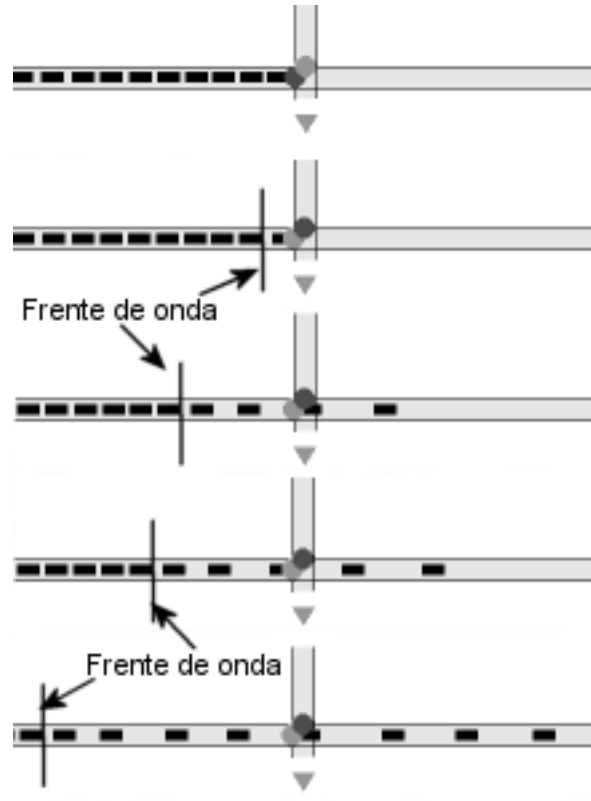
### 2.1 Caracterização do Fluxo Veicular: Analogia com Dinâmica de Fluidos

As grandezas relacionadas ao tráfego como fluxo, concentração e velocidade levam a uma natural comparação à dinâmica dos fluidos [14]. Quando se analisa o sistema com um certo nível de abstração, deixando de se levar em conta a individualidade de cada veículo, fenômenos relacionados ao escoamento dos fluidos são observados e o embasamento teórico para sua interpretação pode ser obtido dessa área de estudo.

Um dos fenômenos já bastante estudado é a onda de choque. Ela é caracterizada pelo movimento de propagação de uma mudança de concentração ou fluxo na via [16]. Lombadas, estreitamento de pistas, semáforos e outros tipos de obstrução ao movimento, assim como qualquer mudança das características da via que proporcione uma diferença de concentração, normalmente geram ondas de choque.

A Figura 2.1 mostra a propagação de uma onda de choque. Inicialmente, com o semáforo fechado, a concentração de veículos era igual à concentração de congestionamento, normalmente designada  $k_j$ , que implica que os veículos estão parados bem próximos uns aos outros. Assim que o sinal abre e os carros começam a andar, a onda se move em direção ao final da fila, e se extingue.

Essas oscilações nos níveis de concentração, sejam elas causadas por mudanças da via, por um aumento ou diminuição do número de veículos devido a acessos na via, geram alterações na velocidade dos veículos. Vários modelos foram desenvolvidos para relacionar a concentração e a



**Figura 2.1:** Onda de choque

velocidade, e são conhecidos como Modelos de Velocidade-Concentração. O mais usado, dada sua simplicidade e poder de expressão, é o modelo linear de Greenshield [14] dado por:

$$u = u_f \left(1 - \frac{k}{k_j}\right) \quad (2.1)$$

com  $u_f$  sendo a velocidade de cruzeiro (*free speed*) da via,  $u$ , a velocidade do veículo e  $k$ , a concentração. O fluxo  $q$  é dado por:

$$q = ku \quad (2.2)$$

Para o caso onde  $u_f$  é de 30 m/s (108 km/h) e  $k_j$  de 0.25 veic/m obtém-se os gráficos mostrados na Figura 2.2, que foram traçados utilizando apenas as Equações 2.1 e 2.2. A relação linear dada por 2.1 é mostrada na Figura 2.2a. Observa-se pela Figura 2.2c que na concentração máxima  $k_j$ , o fluxo é zero. O mesmo ocorre com a velocidade na concentração máxima, conforme mostrado na Figura 2.2b; nesta figura, a relação entre a velocidade e o fluxo foi obtida combinando-se 2.1 e 2.2, resultando em:

$$u = u_f \left(1 - \frac{q}{uk_j}\right). \quad (2.3)$$

Rearranjando os termos, obtém-se:

$$q = -\frac{u^2 k_j}{u_f} + uk_j. \quad (2.4)$$

A expressão da relação entre fluxo e concentração pode ser obtida substituindo-se  $u$  em 2.1 por  $q/k$ , resultando, após alguma manipulação, em:

$$q = -\frac{k^2 u_f}{k_j} + ku_f. \quad (2.5)$$

O gráfico de *Fluxo*  $\times$  *Concentração* mostrado na Figura 2.2c é dado pela Equação 2.5. Observe que traçando uma reta da origem até um ponto qualquer da curva *Fluxo*  $\times$  *Concentração* obtém-se a velocidade no ponto dado pela inclinação desta reta.

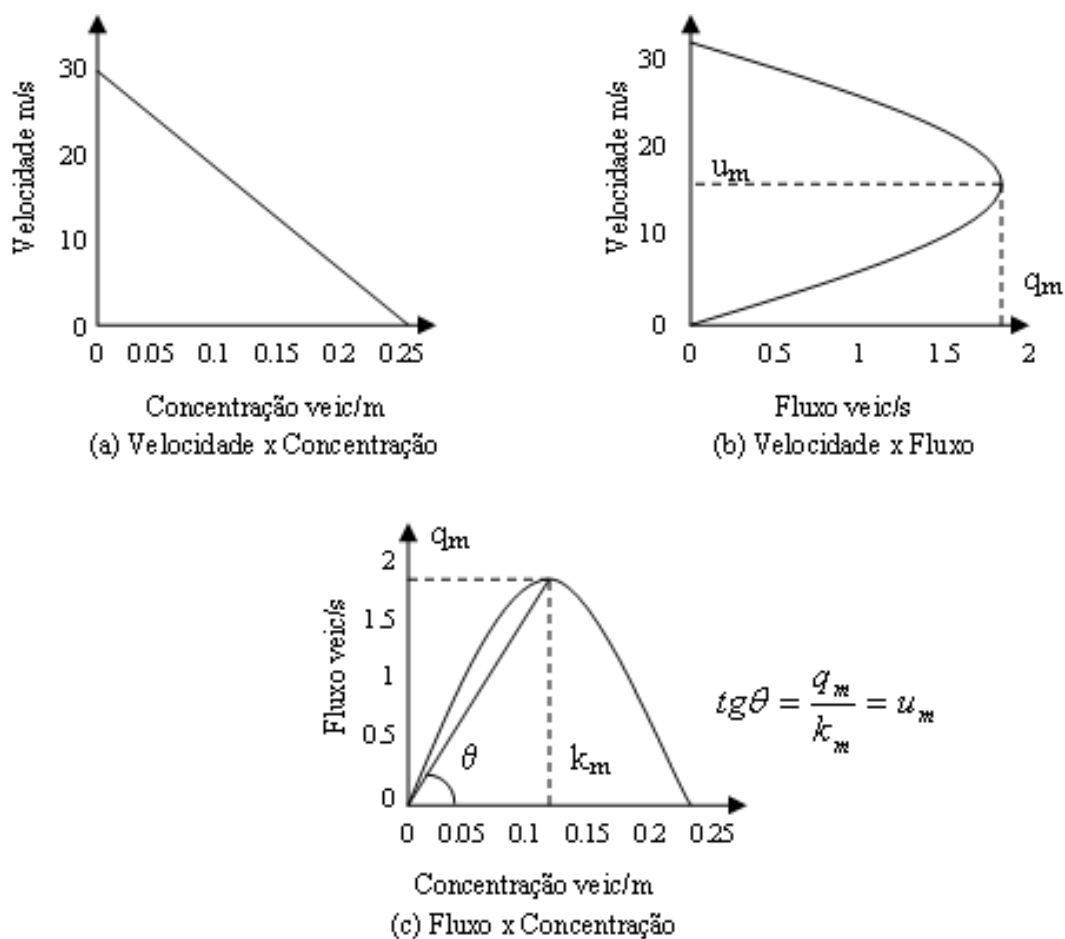
Os pontos destacados  $q_m$ ,  $u_m$ , e  $k_m$  na Figura 2.2 representam, respectivamente, os pontos de máximo fluxo, velocidade dos veículos quando o fluxo é máximo e concentração nesta mesma situação. O ponto de concentração para o máximo fluxo é obtido derivando 2.5 em relação a  $k$ , resultando em:

$$k_m = \frac{1}{2}k_j. \quad (2.6)$$

Já o valor da velocidade para o fluxo máximo é obtido de maneira equivalente, a partir de 2.4, resultando em:

$$u_m = \frac{1}{2}u_f \quad (2.7)$$

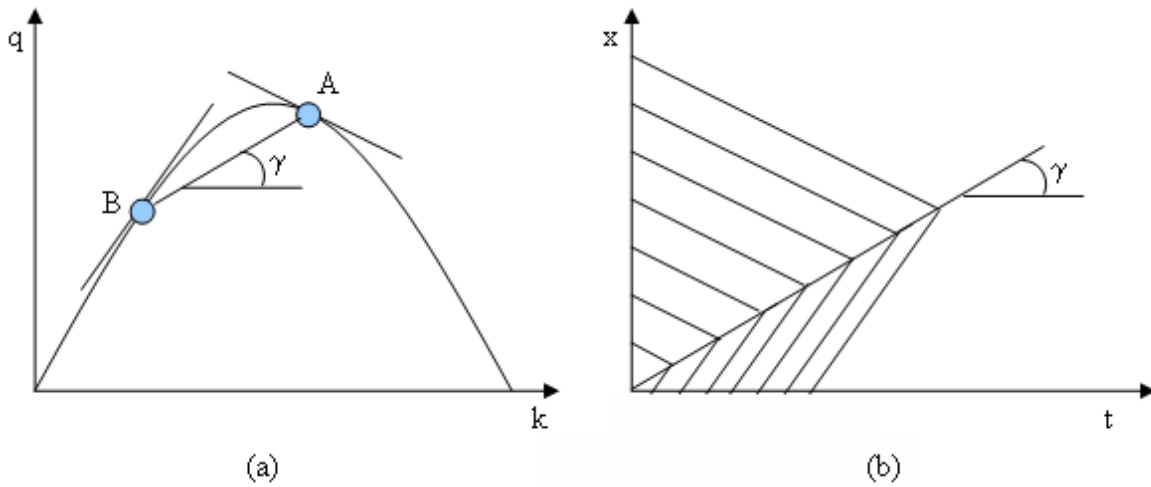
Além das ondas de choque, que podem ser observadas em campo, existe um outro tipo de onda, a onda de fluxo que permite a análise de uma série de situações mesmo não sendo observável em campo [14]. A informação a respeito destas ondas é retirada da curva de *Fluxo*  $\times$  *Concentração*. A reta tangente ao ponto A na Figura 2.3a representa a onda de fluxo naquele ponto, assim como a



**Figura 2.2:** Modelo de Greenshield para descrição da relação entre fluxo, velocidade e concentração em uma rodovia

reta tangente ao ponto B. Observe que quando o ponto A está presente a jusante do ponto B, ou seja, existe um aumento do fluxo de veículos devido, por exemplo, a um acesso à via, o encontro das duas ondas de fluxo gera uma onda de choque com inclinação igual a  $\gamma$ , que por sua vez é observável [14]. A Figura 2.3b define duas regiões distintas, uma delas é preenchida com ondas de fluxo de mesma inclinação à da reta tangente ao ponto A da Figura 2.3a, e a outra região com ondas de fluxo de mesma inclinação à da reta tangente ao ponto B. O encontro das duas regiões destaca a onda de choque de inclinação  $\gamma$ .

O gráfico de *Fluxo*  $\times$  *Concentração* visto na Figura 2.4 mostra o que ocorre quando o fluxo de uma via encontra um gargalo, ou seja, uma restrição ou alteração do fluxo que leve a uma limitação da quantidade de veículos que passam por um determinado local. Nesta figura estão traçadas duas curvas, a curva que contém os pontos 2 e 3 representa a curva de *Fluxo*  $\times$  *Concentração* da via, e a que contém o ponto 1 a curva de *Fluxo*  $\times$  *Concentração* do gargalo. O fluxo na via transcorre normalmente até que se aproxime do ponto 2, que coincide com o ponto de máxima capacidade do



**Figura 2.3:** Ondas de Fluxo

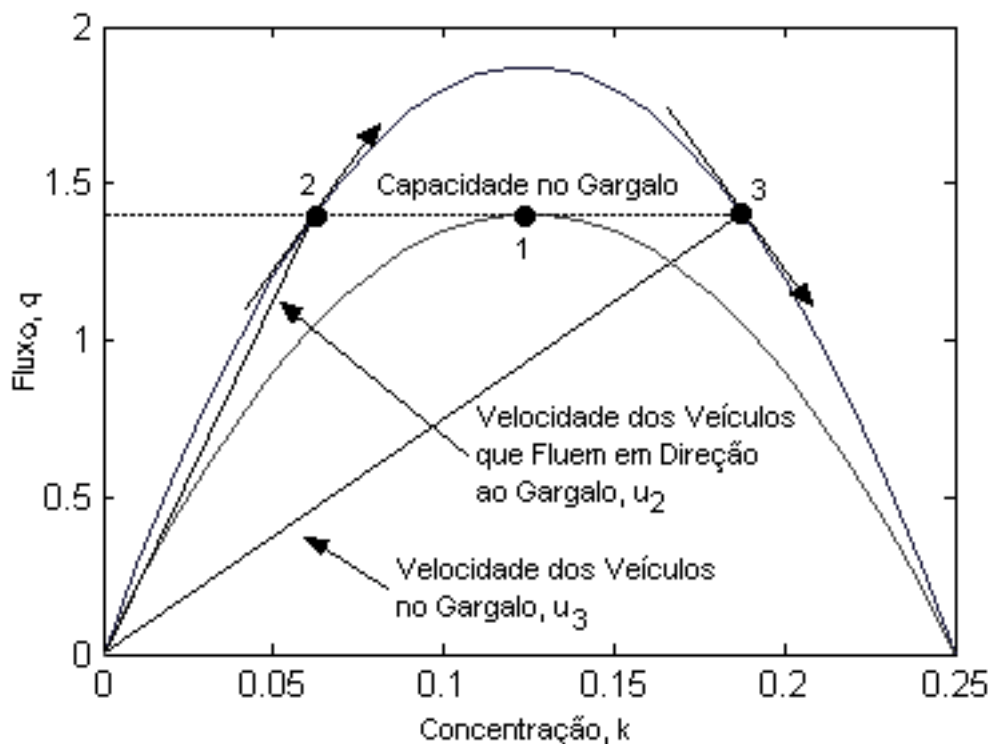
gargalo, ponto 1. O ponto 2 representa o máximo fluxo possível na via até que o gargalo comece a influenciar o tráfego. Quando o fluxo aumenta além deste ponto, o sistema começa a operar a partir do ponto 3, que permite um mesmo fluxo só que com velocidade inferior à do ponto 2. Nesse momento, uma fila começa a se formar e uma onda de choque é transmitida atrás com velocidade  $\frac{\Delta q}{\Delta k}$ . Observe que no limite, quando o valor do fluxo está exatamente no ponto 2, a onda choque se move com velocidade nula, seguindo:

$$\frac{\Delta q}{\Delta k} = \frac{q_3 - q_2}{k_3 - k_2} = 0 \quad (2.8)$$

referente aos pontos 2 e 3.

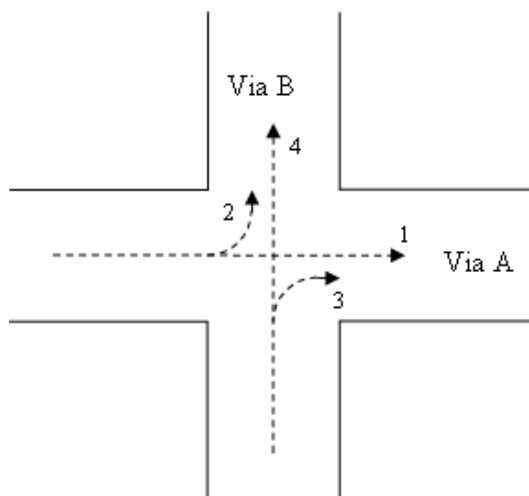
## 2.2 Semaforização no Tráfego

O grande responsável pela formação de ondas de choque, principalmente quando se observa o tráfego em cidades, são os semáforos. Três termos que descrevem as características das temporizações destes são o ciclo, o *split*, e o *offset* [17]. O ciclo é caracterizado pela soma dos tempos de verde, amarelo e vermelho de um determinado semáforo, e a proporção de verde e vermelho no ciclo é dada pelo *split*. Em muitos casos é interessante aplicar uma sincronização dos verdes de forma que os veículos que partem de um determinado ponto de uma via longa, com várias intersecções, não sejam obrigados a parar em cada cruzamento. A essa diferença de tempo na aplicação do verde dá-se o nome de *offset* ou defasagem.



**Figura 2.4:** Curvas de Fluxo-Concentração para uma determinada via e um gargalo hipotético [14]

Outros termos que definem o funcionamento dos semáforos são a fase e o estágio. Uma fase está sempre relacionada a um determinado grupo semaforico, ou seja, um conjunto ótico de vermelho, amarelo e verde, para o caso de veículos, ou, vermelho, vermelho piscante e verde para o caso de pedestres, e se refere à marcação destas cores no tempo. O estágio, por sua vez, se refere ao conjunto de fases, sendo que toda vez que há uma troca de cores em um determinado grupo semaforico, define-se um novo estágio ou a repetição de um estágio. Para ilustrar melhor estes conceitos pode-se imaginar um cruzamento igual ao descrito na Figura 2.5, onde os veículos que trafegam na via A podem efetuar conversão à esquerda e aqueles que trafegam na via B podem efetuar conversão à direita. Imaginando uma situação de operação com três configurações possíveis para este cruzamento estabelece-se o funcionamento do mesmo de acordo com a Figura 2.6. Todo trecho de via que possui ao seu final um semáforo ou um outra via que a cruza, é considerado uma aproximação ou um *link*. Os veículos, aglomerados em fila diante de um semáforo, ao receberem o sinal verde, partem mantendo uma certa distância entre eles, o fator de dispersão, e uma mesma velocidade durante um certo período de tempo. Quando estes veículos apresentam estas características são chamados de um pelotão[2]. Toda via que apresenta um volume de tráfego superior às vias adjacentes pode ser considerada uma arterial ou via principal.



**Figura 2.5:** *Cruzamento simples*

Outro conceito necessário de se destacar é o atraso. Ele representa a quantidade de tempo extra despendido por um determinado veículo devido à incapacidade de cruzar um determinado trecho no tempo previsto. Esse atraso é imposto pelos semáforos, e não resta outra solução a não ser distribuir melhor o tempo perdido entre as vias que se cruzam ou conflitantes [17].

Há variadas técnicas que proporcionam a otimização do atraso, através da sintonia dos parâmetros citados (ciclo, *split* e *offset*). Frequentemente, os sistemas de controle de tráfego em tempo real otimizam independentemente estas três variáveis [SCOOT, SCATS, TUC], havendo técnicas para harmonizar os resultados numa ação de controle que melhor sirva ao desempenho do tráfego.

## 2.3 Formação e Descarga de Filas

A dinâmica das filas em tráfego está diretamente relacionada a duas grandezas do tráfego:

- (i) taxa de chegadas, isto é, o volume de veículos que chega na fila por unidade de tempo ( $\mu$ );
- (ii) taxa de descarga máxima, ou *fluxo de saturação*, que representa a capacidade de serviço da intersecção ( $\lambda$ ).

O fluxo de saturação é um parâmetro muito utilizado nos modelos dinâmicos e depende de vários fatores, dentre os quais, os mais influentes são: geometria da intersecção (principalmente largura), porcentagem de veículos que fazem conversão à esquerda e à direita, declividade da via, estacionamento de veículos e presença de veículos comerciais (ônibus e caminhão)[17]. Vale ressaltar



que ele independe das condições de tráfego, ou seja, é basicamente uma característica inerente de cada intersecção e considerado constante. Quando há a existência de semáforos, o fluxo é interrompido durante o vermelho e quando ocorre o verde o fluxo de saturação se comporta como mostrado na Figura 2.7. Toda via possui um parâmetro denominado velocidade de cruzeiro, que reflete a velocidade que um veículo imprimiria caso não houvesse nenhum tipo de restrição à sua passagem. Em seguida à transição de vermelho para verde assim como de verde à vermelho existe um transitório do fluxo de saturação. Descontado esse transitório, chega-se a um valor correspondente ao fluxo de saturação real, que é constante. O tempo que o motorista leva para reagir à mudança na sinalização, onde não há fluxo de veículos ou o mesmo ainda não atingiu seu valor esperado dá-se o nome de tempo perdido. E o tempo onde o fluxo opera em regime dá-se o nome de tempo de verde efetivo. Ou seja, o tempo de verde efetivo é a soma dos tempos de verde e amarelo decrescido do tempo perdido:

$$vd_{ef} = vd + t_{am} - t_{perd}, \quad (2.9)$$

onde:

$vd_{ef}$ : tempo de verde efetivo;

$vd$ : tempo de verde;

$t_{am}$ : tempo de amarelo; e

$t_{perd}$ : tempo perdido.

Outras grandezas ligadas ao fluxo de saturação são a taxa de ocupação e o grau de saturação. A taxa de ocupação de uma aproximação é definida como sendo a relação entre a demanda de tráfego, ou seja, o número de veículos que acessam a via no tempo, e o fluxo de saturação como descrito a seguir:

$$y_{(i)} = \frac{q_{(i)}}{q_{s(i)}}, \quad (2.10)$$

onde:

$y_{(i)}$ : taxa de ocupação da aproximação  $i$ ;

$q_{(i)}$ : demanda da aproximação  $i$  em veic/h;

$q_{s(i)}$ : fluxo de saturação da aproximação  $i$  em veic/h.

O grau de saturação é a relação entre a demanda de tráfego e a capacidade de atendimento de uma aproximação, que por sua vez é uma relação entre o fluxo de saturação, o tempo de ciclo e o

tempo de verde efetivo:

$$X_{(i)} = \frac{q_{(i)}}{\text{capacidade}_{(i)}} = \frac{q_{(i)}}{q_{s(i)} \frac{vd_{ef}}{C}} = y_{(i)} \frac{C}{vd_{ef}} \quad (2.11)$$

onde:

$X_{(i)}$ : grau de saturação da aproximação  $i$ ;

$\text{capacidade}_{(i)}$ : capacidade de atendimento da aproximação  $i$ ;

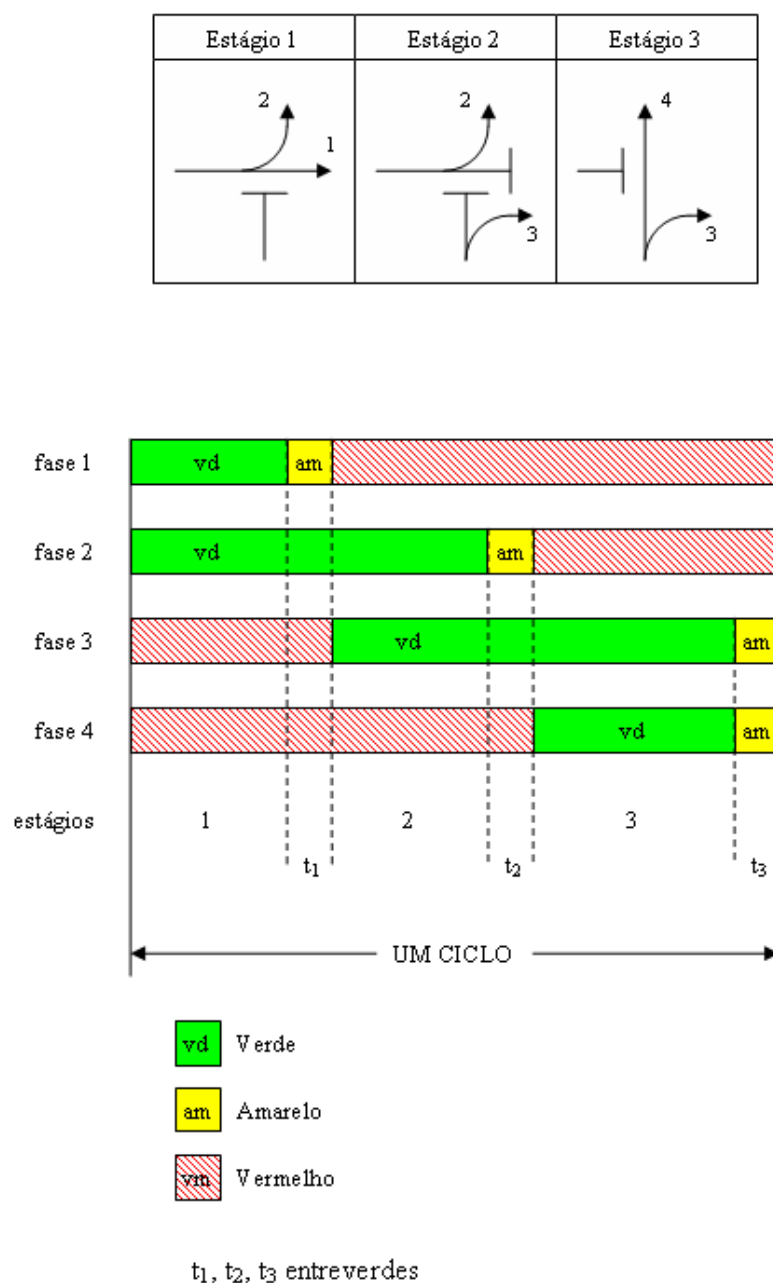
$C$ : tempo de ciclo.

A Figura 2.8 representa a formação e dissipação de uma fila em semáforo sob condições ideais, ou seja,  $\mu$  e  $\lambda$  são constantes e representam a inclinação das retas, como mostrado no gráfico *Distância x Tempo* da Figura 2.8. A área em cinza no gráfico de *Número de veículos parados em fila x Tempo* representa o atraso total sofrido pelos veículos que tiveram que parar na intersecção.

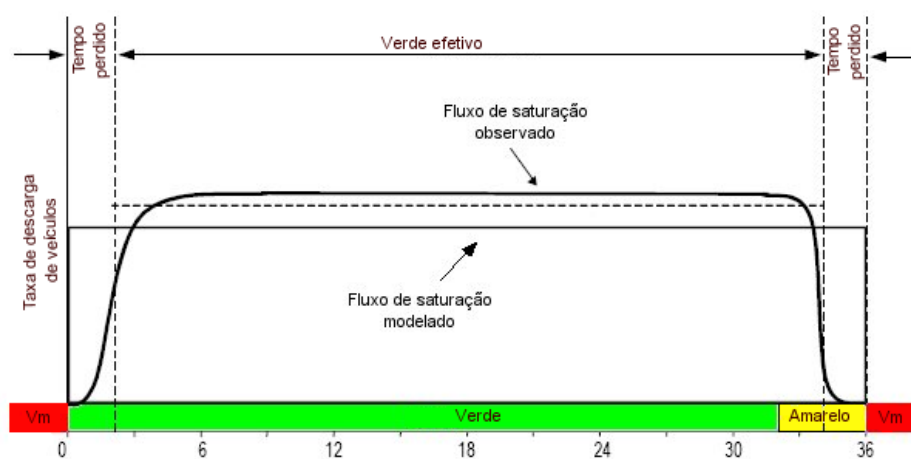
## 2.4 Conclusão

Neste capítulo foram apresentados conceitos introdutórios sobre o comportamento do tráfego veicular que serão usados ao longo do trabalho. A analogia com fluidos é importante para a discussão de alguns modelos de filas apresentados a frente, muito embora não seja aplicada no modelo dinâmico desenvolvido na proposta deste trabalho. Para esta, importa rever o conceito de fluxo de saturação.

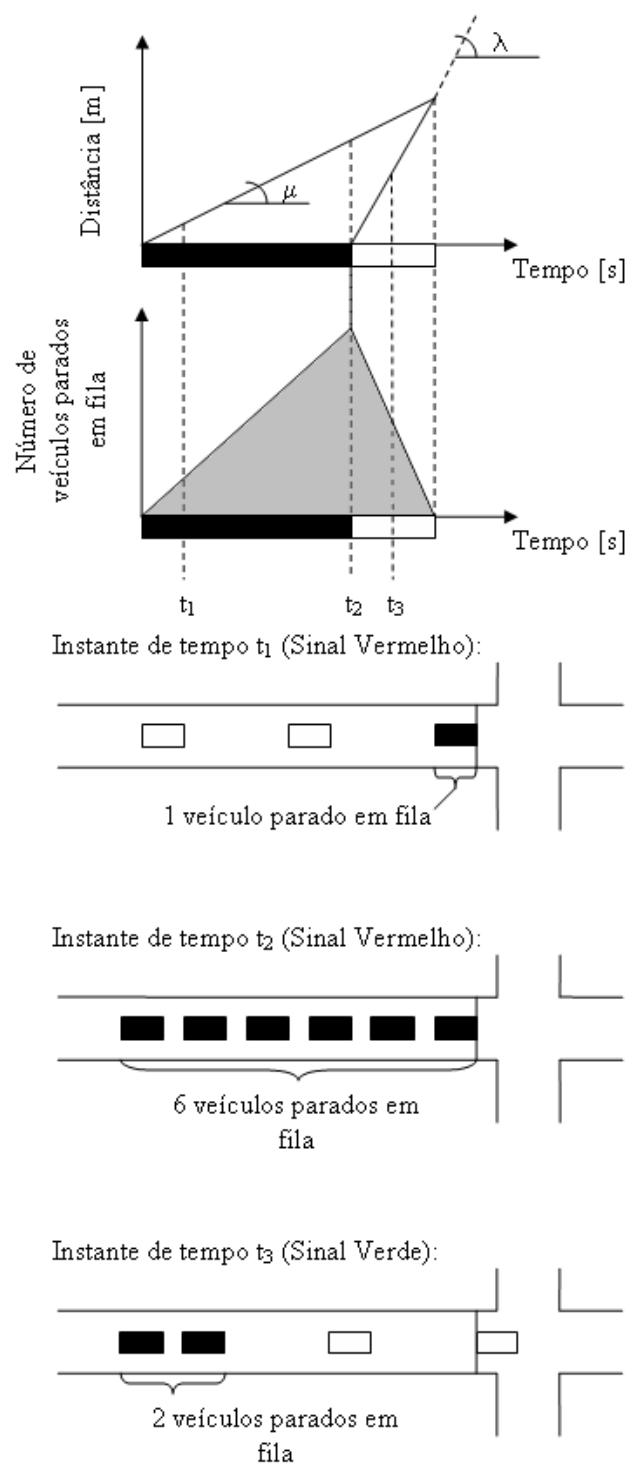
No capítulo a seguir serão revistas estratégias de controle que usam modelos dinâmicos de filas para a atuação em tempo real baseada em contagens de tráfego.



**Figura 2.6:** Temporização de um cruzamento simples



**Figura 2.7:** Histograma da descarga de veículos durante um verde



**Figura 2.8:** Formação e dissipação de uma fila hipotética

## Capítulo 3

# Contexto: Controle de Tráfego em Tempo Real

Qualquer sistema de controle de tráfego em tempo real necessita de uma estimativa do estado das vias para efetuar os cálculos e determinar os tempos das fases. Sendo assim, a estimação das filas torna-se um requisito importante para qualquer destes sistemas, e quão melhor for a estimativa, melhor será o resultado final. A seguir, é feita uma pequena revisão a respeito de alguns sistemas de controle de tráfego em tempo real existentes. No capítulo 4, serão estudadas técnicas de estimação de filas empregadas em algumas das estratégias discutidas a seguir.

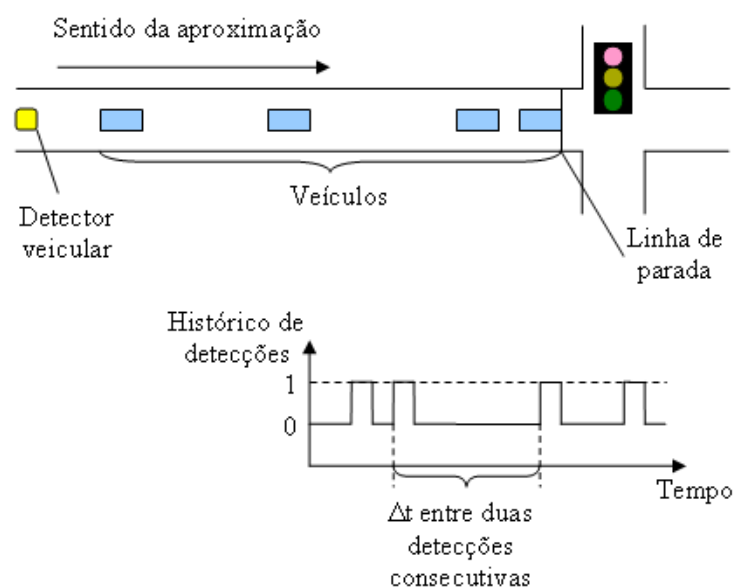
### 3.1 Sistemas de Controle

Como a razão de se buscar uma melhor solução para o problema de estimação de filas é basicamente melhorar a qualidade de informação utilizada por sistemas de controle de tráfego, alguns deles serão apresentados a seguir de forma a situar melhor o estudo.

#### 3.1.1 Brecha Máxima

Uma primeira abordagem para se efetuar o controle atuado pelo tráfego utiliza o conceito de brecha máxima [3]. Este sistema é dotado de um detector veicular posicionado a montante da aproximação, ou seja, em sua entrada, e monitora o tempo decorrido entre duas detecções consecutivas, Figura 3.1. Os tempos de verde máximo e mínimo são determinados, e enquanto o intervalo

de tempo entre as chegadas não ultrapassar um limite, o verde é mantido para aquela determinada aproximação, até que um máximo seja atingido. Este tempo limite normalmente é igual ao tempo de percurso do veículo, em velocidade de cruzeiro, desde a posição do detector até a linha de parada [3]. Uma variante desta é a aplicação de um plano fixo selecionado de acordo com o tempo médio de entre-chegadas, o que fornece uma estimativa do estado do tráfego. Ou seja, quanto menor o tempo de entre-chegadas maior o fluxo de veículos [3].



**Figura 3.1:** Formação e dissipação de uma fila hipotética

### 3.1.2 SCOOT - *Split Cycle Offset Optimization Technique*

O SCOOT é um sistema já bastante conhecido e utilizado em algumas cidades do globo como Londres, Toronto, São Paulo, Dubai e Madrid, entre outras. Ele foi desenvolvido no Reino Unido, e sua inauguração se deu na cidade de Glasgow, Escócia, em 1975. Atualmente é comercializado pela empresa Siemens Traffic [22].

A hierarquia de controle do sistema está dividida em cinco níveis. No topo encontra-se a Área, que representa toda área sob controle. Esta é dividida em regiões, onde cada Região acumula um grupo de semáforos que operam com um mesmo tempo de ciclo e são sincronizados ou coordenados entre si através de defasagens. Uma Região pode conter um ou mais Grupos. Um Grupo é composto por dois ou mais Nós. O Nó é a menor unidade de controle e normalmente corresponde a uma intersecção semaforizada. Cada Nó pode ser designado "mestre" ou "escravo", o que significa que

os escravos irão respeitar uma certa defasagem em relação ao mestre para o início do ciclo. Quando o mestre do grupo opera em modo local todos os outros, os escravos, também passam a operar individualmente. Por último estão os Links, que compõem o Nó, representando as aproximações do cruzamento semaforizado.

Os detectores do SCOOT são alocados de forma que haja de oito a doze segundos entre a detecção de um veículo e sua chegada na linha de retenção. Dessa forma, há tempo suficiente para o sistema reagir e procurar escoar esses veículos dentro do ciclo vigente [18].

Todos os históricos de chegadas são armazenados nos denominados *Cyclic Flow Profiles*. Há dois tipos deles, os de perfil curto e os de perfil longo. Os de perfil curto abrangem apenas o ciclo em curso, e os de perfil longo mantêm um histórico maior, sendo ambos atualizados a cada intervalo de tempo.

Como evidenciado no nome, este sistema busca otimizar três parâmetros: o *Split*, o tempo de Ciclo e o *Offset*, resultando em uma diminuição do número de paradas e do atraso [18]. Para cada um desses parâmetros há um otimizador específico que atua no sistema de acordo com a Tabela 3.1.

Otimizador	Frequência	Mudanças Possíveis [s]	Mudanças de Referência [s]
<i>Split</i>	uma vez a cada mudança de estágio	-4;0;+4	-1;0;+1
<i>Offset</i>	uma vez a cada ciclo	-4;0;+4	-4;0;+4
<i>Ciclo</i>	uma vez a cada 2,5 ou 5 minutos	$\pm 16; \pm 8; \pm 4; 0$	$\pm 16; \pm 8; \pm 4; 0$

**Tabela 3.1:** Características dos Otimizadores do Sistema SCOOT

### Otimizador de *Split*

O otimizador de *Split* atua cinco segundos antes do instante previsto de mudança de estágio, ou ponto de referência, de forma que se houver a necessidade de encurtar o estágio, haja tempo para ele atuar, já que o decremento máximo é de quatro segundos, segundo a Tabela 3.1. A decisão de encurtar, manter ou aumentar o estágio vigente também influi na duração do estágio do ciclo seguinte. Ou seja, quando se decrementa o estágio atual de quatro segundos, o mesmo estágio do ciclo seguinte recebe um segundo a menos de tempo, ou se ele é incrementado de quatro segundos, sua próxima instância será acrescida de um segundo. Como o otimizador de *Split* atua na proporção do tempo de verde e vermelho, ele não altera o tempo total de ciclo.

Este otimizador visa minimizar o quadrado do maior grau de saturação nos *links* do nó (ou



cruzamento). A seguir, é dado um exemplo de um nó com 3 *links* e 2 estágios, conforme mostra a Tabela 3.2.

<i>Link</i>	Estágio
A	1
B	2
C	2

**Tabela 3.2:** *Links e seus respectivos Estágios*

Para o estágio 2, por exemplo, o sistema calcula o grau de saturação e o seu quadrado, de acordo com as três hipóteses: aumentar, manter ou diminuir o tempo de verde, como mostrado na Tabela 3.3, onde "X" é o grau de saturação.

Link	Prolonga		Mantém		Encurta	
	X	X <sup>2</sup>	X	X <sup>2</sup>	X	X <sup>2</sup>
A	0,80	0,64	0,70	0,49	0,6	0,36
B	0,85	0,72	0,90	0,81	0,95	0,90
C	0,45	0,20	0,55	0,30	0,65	0,42
máx	-	0,72	-	0,81	-	0,91

**Tabela 3.3:** *Comparação de performance entre as alternativas*

O *link* B é aquele que possui o maior grau de saturação dos links no nó. Entre as três opções (prolongar, manter e diminuir), aquela que apresenta o menor quadrado do grau de saturação é a opção "Prolonga", então o tempo de verde do estágio 2 é acrescido de quatro segundos, segundo a Tabela 3.1.

### Otimizador de *Offset*

Este, por sua vez, atua a cada ciclo tomando uma decisão no meio do estágio principal, que normalmente representa o primeiro estágio do ciclo. Sendo que esta decisão será implementada no ciclo seguinte e será mantida para os demais ciclos consecutivos.

A decisão é tomada com base no valor de PI (*performance index*):

$$PI = \text{atraso} + \text{índice de paradas} + \text{índice de congestionamento}$$

O índice de paradas é definido como sendo o número de paradas multiplicado por um fator denominado *stop penalty* de forma a manter a proporção com o atraso e o índice de congestionamento,

ambos dados em LPU's (*Link Profile Units*). Esta unidade de medida será definida no Capítulo 4, Seção 4.2, assim como o índice de congestionamento.

A Tabela 4.1 mostra um exemplo de um nó com quatro *links*, e os PI's destes para as três hipóteses.

<i>Link</i>	Aumenta	Mantém	Diminui
A	126	121	120
B	82	78	8
C	143	139	141
D	96	95	96
SOMA	447	432	447

**Tabela 3.4:** Comparação entre os Performance Indexes dos Links [18]

O menor PI é 432 na coluna "Mantém".

### Otimizador de Ciclo

Este otimizador normalmente roda a cada cinco minutos, porém, dependendo das condições de tráfego, ele pode atuar a cada dois minutos e meio. Essa mudança é automática e ocorre quando o ciclo começa a aumentar sua duração.

Os passos de incremento e decremento variam de acordo com o tamanho do ciclo. Para ciclos de 32 a 64 segundos, os passos são de 4 segundos; ciclos de 65 a 128 segundos, passos de 8 segundos; e para ciclos maiores que 128 segundos, passos de 16 segundos.

Para cada nó é calculado um ciclo chamado de "ciclo ideal". O ciclo ideal do nó é calculado em função do "nível de saturação desejado" para o link mais saturado do nó, que normalmente é de noventa por cento, ou seja, noventa por cento do tempo de verde é utilizado para descarregar todos os veículos da via.

O ciclo ideal do nó é calculado pela seguinte expressão:

$$INCT : \frac{TS \times C \times LT}{TS \times C - NS \times (C - LT)} \quad (3.1)$$

onde:

INCT : tempo ideal do ciclo no nó (*ideal node cycle time*) [adimensional %];

TS : nível de saturação desejado (*target saturation*) [adimensional %];

C : tempo do ciclo corrente [segundos];

LT : tempo perdido (*lost time*) [segundos];

NS : nível de saturação do link mais saturado do nó [adimensional %].

Se qualquer link do nó tiver grau de saturação maior que 90%, então o seu INCT é aumentado até que tenha 90% de saturação. Se todos os links do nó tiverem o grau de saturação menor que 90%, então seu INCT é diminuído até atingir essa marca.

Define-se como MPCY (Ciclo mínimo prático ou *minimum practical cycle time*) de um nó o número inteiro (maior que o INCT) que seja múltiplo de 4, 8 ou 16 e mais próximo do INCT. O maior MPCY da região será o ciclo da região.

Se houver mudança de ciclo, o sistema repete pelo menos uma vez o ciclo anterior, antes da mudança.

### 3.1.3 Modelos de Horizonte Deslizante

Os modelos de Horizonte Deslizante são aqueles que, através de dados históricos e condições vigentes do tráfego, prevêem o estado futuro das vias com base na simulação de um modelo de dinâmica de tráfego. De acordo com o resultado, medidas podem ser tomadas para evitar que certos pontos indesejáveis de operação sejam atingidos. Estes modelos trabalham com um período de amostragem relativamente curto, em torno de 4 segundos, e a previsão normalmente é feita para um horizonte do tamanho de um ciclo típico (60 a 90 segundos). Neste horizonte é feita uma previsão da evolução das filas e para isso, modelos de dinâmica de filas são utilizados.

#### PRODYN

O PRODYN [8], faz parte de uma segunda geração de sistemas de controle que surgiu com o intuito de aperfeiçoar o gerenciamento das redes de tráfego. Sua abordagem combina uma estratégia de horizonte deslizante com um controle descentralizado, ou seja, o cálculo é feito considerando apenas uma intersecção por vez.

Estabelecendo-se  $T$  como o período de amostragem (normalmente de cinco segundos), e  $K$  o tamanho do horizonte, expresso em unidades de períodos de amostragem, tem-se que o método, ao nível da intersecção durante os tempos  $kT$  e  $(k+1)T$ , consiste em:

- (i) prever as chegadas de veículos de cada *link* para o intervalo  $[kT, (k + K + 1)T]$ ;
- (ii) estimar as filas em  $kT$  e prevê-las para  $(k + 1)T$ ;
- (iii) prever as taxas de conversão(ou seja, a porcentagem de veículos que viram à esquerda e/ou à direita), o estágio e o tempo decorrido desde a última mudança de fase para  $(k + 1)T$ ;
- (iv) otimizar os controles no horizonte  $[(k + 1)T, (k + K + 1)T]$  para os estados resultantes de (ii) e (iii) e as chegadas resultantes de (i).

O resultado de (iv) fornece o controle a ser aplicado entre  $(k + 1)T$  e  $(k + 2)T$ . Aquelas intersecções que possuem à jusante (à frente) outras intersecções controladas pelo sistema, simulam os resultados obtidos pela aplicação do controle ótimo no período  $[(k + 1)T, (k + K + 1)T]$ , usando taxas de conversão fixas, e as enviam para essas intersecções adjacentes. Durante o período  $(k + 1)T$  e  $(k + 2)T$ , estas se baseiam nos dados recebidos e os utilizam como previsão de chegadas. As chegadas para o resto do horizonte  $[(k + K + 1)T, (k + K + 2)T]$  são previstas como se não houvesse intersecções a montante (atrás).

O critério de otimização a ser minimizado para as intersecções é a soma dos atrasos sofridos durante o horizonte e um critério de parada que é uma estimativa do atraso associado a um determinado estado ao final do horizonte.

Dentro do processo de otimização, que é feito através de Programação Dinâmica Direta [9], o controle é limitado por quatro restrições. A primeira delas limita o número de estágios possíveis para cada intersecção. A segunda, proíbe algumas transições de estágios, determinadas pelo operador. E a terceira e quarta restringem os tempo máximo e mínimo de duração de cada estágio.

Por ser um sistema descentralizado, a cada nova otimização no horizonte realizada por um determinado controlador, são calculados também as descargas que ocorreriam se esse controle ótimo fosse implementado durante todo esse horizonte, e essa informação é repassada aos controladores à jusante. Dessa forma, estes controladores terão uma melhor previsão das chegadas futuras num próximo passo de otimização.

## OPAC

OPAC ou *Optimized Policies for Adaptive Control* foi originalmente desenvolvido na Universidade de Massachusetts [11], e é uma estratégia de controle distribuída provida de um algoritmo de programação dinâmica com o objetivo de diminuir o atraso e o número de paradas em intersecções.

Ele utiliza tanto medidas reais de demanda como estimadas para determinar a duração das fases, que são restritas apenas por valores máximos e mínimos do tempo de verde, e por um tempo de ciclo virtual quando roda em modo coordenado.

O desenvolvimento deste sistema progrediu em quatro versões que serão apresentadas a seguir.

- **OPAC-1: Programação Dinâmica**

A primeira versão foi desenhada para servir de base a desenvolvimentos futuros do projeto. Programação Dinâmica é uma ferramenta que permite encontrar um ótimo global para processos de decisão de múltiplos estágios. Devido à grande quantidade de processamento envolvido e à falta de dados em tempo real não pode ser utilizada diretamente para o controle. O que se faz é criar todo tipo de cenário possível como condição inicial e rodar o sistema guardando os resultados. Dessa forma, ela serve como referência para comparação com as outras estratégias de controle mais práticas.

- **OPAC-2: Otimização Seqüencial**

Este segundo algoritmo desenvolvido consiste de uma simplificação do primeiro. Ele foi concebido de forma a servir de módulo de construção para uma estratégia *online* distribuída. OPAC-2 tem as seguintes características:

- O período de controle é dividido em estágios de  $\Delta t_e$  segundos. Onde, neste caso,  $\Delta t_e$  tem aproximadamente a duração de um ciclo típico.
- Cada estágio é dividido em um número inteiro de intervalos de  $\Delta t_i$  segundos, tipicamente de 2 – 5.
- Durante cada estágio deve haver um número suficiente de fases que garantam que nenhum ótimo será deixado de lado. O ponto de troca de fase é expresso em segundos a partir do início do estágio.
- Para uma dada seqüencia de mudança de fases em um estágio  $j$ , a medida de desempenho para cada aproximação é definida como sendo o somatório, sobre todos os intervalos do estágio, do estado inicial da fila mais as chegadas e menos as partidas de cada intervalo. Ou seja, a integral da curva de tamanho da fila para a duração do estágio.

O problema de otimização para OPAC-2 é então definido:

Para cada estágio, dados os estados iniciais de cada fila para cada aproximação e para cada intervalo do estágio, determinar os tempos de troca de fase, em termos de intervalos, que asseguram o atraso mínimo para os veículos sobre todo o estágio.

O procedimento utilizado para resolver o problema é conhecido como método OSCO (*Optimal Sequential Constrained Search*) [11] ou busca ótima seqüencial com restrições. É uma busca exaustiva de todas possíveis combinações de mudanças de fase válidas dentro de um estágio que determinam um conjunto ótimo. Os tempos de mudança de fase são restritos pelos tempos máximo e mínimo de duração de uma fase.

- **OPAC-3: Horizonte Deslizante**

Embora o OPAC-2 seja mais apropriado a operar em tempo real do que o OPAC-1, ele necessita do conhecimento das chegadas de todo o período do estágio, que tipicamente tem 1 ou 2 minutos de duração. Dessa maneira, o estágio é dividido em  $n$  intervalos, e de acordo com os detectores posicionados a montante de cada *link* as chegadas reais são computadas para os  $k$  primeiros intervalos. O restante, ou seja, aquelas chegadas que ainda não ocorreram, é obtido através de um modelo para os  $n - k$  intervalos. O estágio é então chamado de Horizonte e tem normalmente a duração de um ciclo médio.

Uma política ótima de mudança de fases é calculada para todo o horizonte, porém apenas parte dela é implementada. Com o avanço do tempo, o horizonte vai rolando e dados reais de fluxo vão sendo obtidos e utilizados para um novo cálculo, permitindo que as decisões sejam revisadas e melhoradas.

Um período de rolagem do horizonte menor implica num maior número de cálculos porém permite resultados mais próximos do ótimo.

- **OPAC-4: VFC (Virtual Fixed Cycle)**

Como parte do projeto do Sistema de Controle em Tempo Real Adaptativo (RT-TRACS *Real-Time Traffic-Adaptive Signal Control System*) da FHWA (*Federal Highway Administration*) do Departamento de Transportes dos EUA [11], a Universidade de Massachusetts, Lowell (UML) expandiu a lógica de controle do OPAC para, a desejo do operador, utilizar a opção de estratégia de sincronização/cordenação em vias arteriais e malhas viárias. Esta versão, conhecida como VFC ou Ciclo Fixo Virtual recebeu este nome pois o tempo de ciclo oscila ao redor de um tempo de ciclo virtual podendo ser maior ou menor que este com a finalidade de melhor gerenciar a dinâmica do tráfego.

Esta arquitetura de controle é dividida em três camadas. A camada 1 ou Camada Local de Controle implementa o OPAC-3, ou seja, o procedimento de horizonte deslizante, sujeito às restrições da camada 3 de VFC. A camada 2 ou Camada de Coordenação otimiza os *offsets* de cada interseção a cada ciclo. A camada 3 ou Camada de Sincronização, calcula o tempo de ciclo virtual para toda a malha (uma vez a cada  $n$  minutos, especificado pelo operador). A duração

do tempo do ciclo pode ser determinada separadamente para grupos de interseções, como for necessário. Com o passar do tempo o ciclo flexível e os *offsets* são atualizados conforme o sistema se adapta às condições de tráfego.

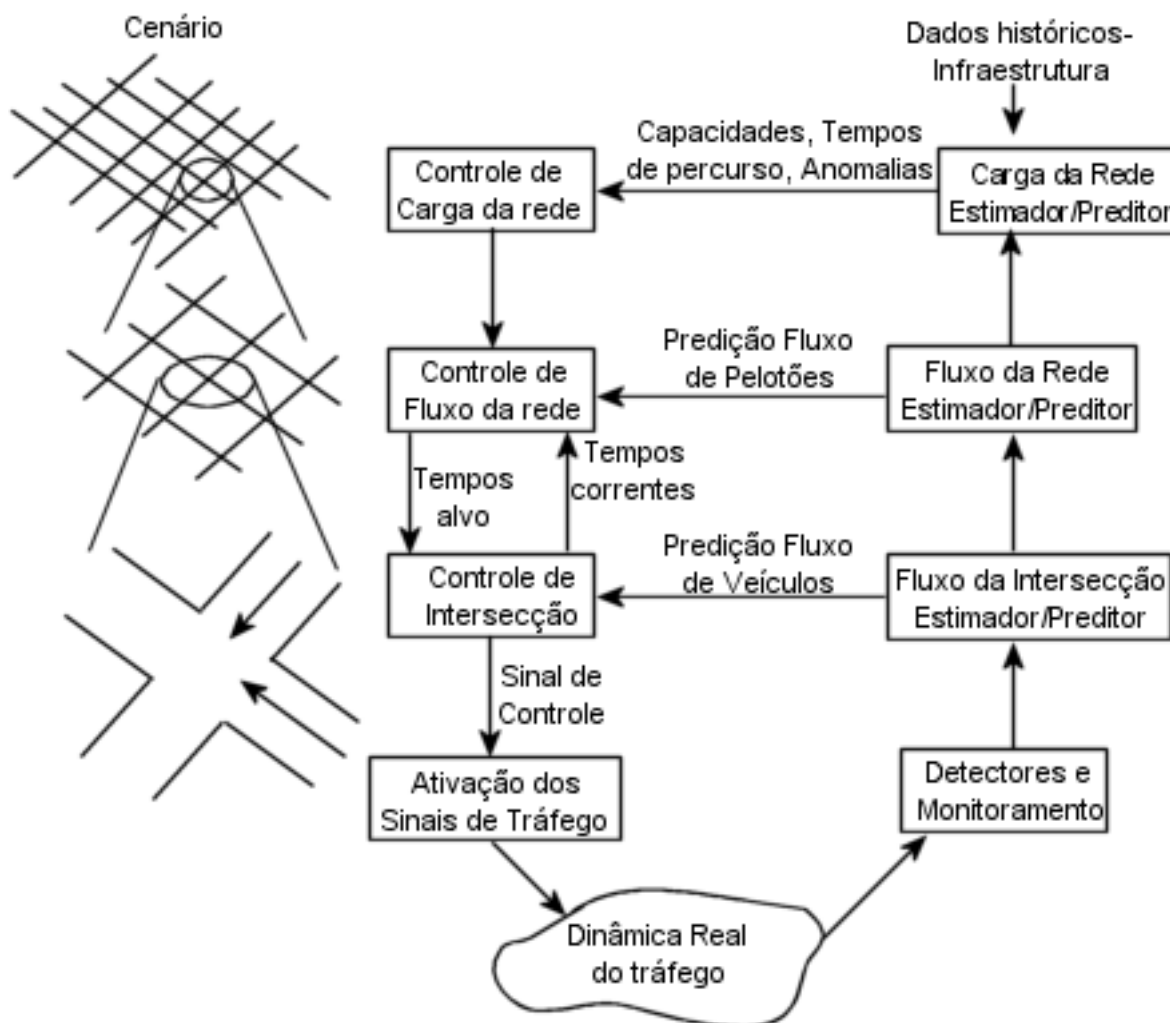
## RHODES

Este sistema utiliza uma arquitetura de controle que decompõe o problema em vários sub-problemas interligados de maneira hierárquica [19]. Ele prevê os fluxos de tráfego com resoluções apropriadas (carros individuais ou pelotões) visando um controle pró-ativo, e possui vários módulos de otimização para resolver os sub-problemas utilizando uma estrutura de dados, métodos de comunicação e algoritmos computacionais que permitem uma rápida resolução dos sub-problemas e transferência dessas soluções ao campo dentro dos limites de tempo impostos.

No topo da arquitetura se encontra um modelo dinâmico da rede que captura as mudanças sutis das características do tráfego ao longo do tempo. Essas características se referem à geometria das vias (rotas disponíveis, obras, desvios, etc.) e às rotas típicas utilizadas. Baseando-se na carga do sistema como um todo, pode-se estimar a carga em cada *link* particular em termos de veículos por hora. Essas estimativas permitem ao sistema alocar os tempos de verde de acordo com as demandas existentes para cada sentido de movimento (Norte-Sul, Norte-Sul conversão à esquerda, etc.). Essas decisões são tomadas pelo nível mediano da hierarquia, também chamado de "controle de fluxo da rede". As medidas de fluxo de tráfego a esse nível são expressas em termos de pelotões de veículos e suas velocidades. Dados os tempos de verde aproximados, o "controle de intersecção", ao terceiro nível, seleciona a época das mudanças de fase baseado nas chegadas observadas e previstas de veículos individuais em cada intersecção.

Essencialmente, em cada um dos três níveis há um componente estimador/preditor e um componente de controle. Os critérios de otimização utilizados podem ser quaisquer desde que sejam expressos em termos de medidas efetivas como atraso médio, número de paradas, capacidade de vazão, etc.

No nível inferior da hierarquia de controle do RHODES, para o Controle de Intersecção, é utilizado um algoritmo de Programação Dinâmica conhecido como COP (*Controlled Optimization of Phases*) [21]. O método de horizonte deslizante permite que as observações e previsões mais recentes sejam utilizadas na otimização. A otimização é iniciada em um determinado ponto  $t_0$  e considera um horizonte de tempo de  $T_s$ , que normalmente varia entre 40 e 60 segundos. Todas as fases, são inseridas no sistema na forma de estágios, e quando nenhuma restrição de ordem é imposta,



**Figura 3.2:** *Arquitetura RHODES*

é possível obter seqüenciamento variável de fases e omissão destas, dependendo do que melhor servir à função objetivo.

A lógica do Controle do Fluxo de Rede é baseada no modelo REALBAND [5], que otimiza o movimento de pelotões para sub-redes. Quando o objetivo selecionado é o de minimizar o número de paradas, o algoritmo procura formar bandas de progressão baseadas em observações reais de pelotões. Cada pelotão é caracterizado em tamanho (número de veículos) e velocidade, e pode ser identificado quando a densidade de fluxo captada pelos detectores atinge um determinado nível por um determinado período de tempo. As decisões tomadas pelo REALBAND são utilizadas como restrições no Controle de Intersecção (COP).



### 3.1.4 TUC - *Traffic-responsive Urban Control*

O TUC foi inicialmente desenvolvido como parte de um sistema de controle de tráfego integrado para redes de corredores dentro de um projeto europeu TABASCO (*Transport Applications in Bavaria, Scotland and Others*) [6].

O objetivo principal era atacar o problema de controle que, particularmente sob condições saturadas, ainda carecia de uma solução adequada e eficiente. Em contraste com outros métodos de controle o TUC permite o uso de métodos de otimização e controle altamente eficientes e de complexidade polinomial levando a uma fácil aplicação, instalação e manutenção.

O TUC consiste de quatro partes principais, a primeira delas é o Controle de *Split* [6]. Seu objetivo é minimizar o risco de sobre-saturação e o desperdício do tempo de verde quando a fila a jusante da intersecção impede que a fila a montante seja descarregada. O controle se dá diretamente através da manipulação apropriada dos tempos de verde dados os tempos de ciclo e *offset*. O método de otimização usado é a Programação Linear Quadrática. Esta solução foi viabilizada através dos trabalhos de Gazis e Potts [13]. Uma das variáveis que faz parte do problema de tráfego é a indicação semafórica, que por natureza é uma variável discreta binária. Os algoritmos de Programação Inteira Mista acabam se tornando muito pesados impossibilitando sua utilização pura em tempo real. A solução encontrada foi declarar essa variável como sendo uma porção do tempo de ciclo, pré-definido, ou seja encontrar o *split* ideal, eliminando assim a variável inteira.

O Controle de Ciclo representa a segunda parte [7]. Este controle é implementado através de um simples regulador proporcional que se ajusta de acordo com o máximo índice de saturação dentro da malha. Como um dos objetivos é realizar a coordenação de semáforos, um mesmo tempo de ciclo é compartilhado entre todas as intersecções. Um tempo de ciclo grande permite reduzir a quantidade de tempo perdido entre verdes, possibilitando um aumento na capacidade da intersecção. Por outro lado, quanto maior seu valor maior o atraso ocasionado em intersecções sub-saturadas. Quando determinadas intersecções possuem um nível suficientemente baixo de saturação de forma que a redução do ciclo à metade ainda a mantenha a uma margem segura do ponto crítico de saturação, seu ciclo é então reduzido à metade, prática conhecida como *double-cycling*. Uma vez determinado o tempo de ciclo, seu valor é repassado ao Controle de *Split* para que seja utilizado nos cálculos seguintes.

A terceira parte é ocupada pelo Controle de *Offset* ou Defasagem. Ele é realizado através de uma lei de controle descentralizado que modifica os *offsets* dos estágios principais de intersecções sucessivas de arteriais de modo a gerar ondas verdes, e levando em consideração a existência de filas.

Ela é dita descentralizada pois realiza os cálculos para cada par de intersecções, ou seja, entre a 1 e a 2, depois entre a 2 e a 3, a 3 e a 4, e assim sucessivamente. O *offset* é primeiramente calculado para as arteriais de mão única que não se interceptam. No caso de arteriais de mão dupla, um *offset* para cada direção é determinado e depois uma média ponderada dos dois é implementada. Outra possibilidade é aplicar aquele *offset* da via cuja direção apresenta maior carga. No caso de arteriais que se cruzam, O TUC leva em consideração uma prioridade pré-especificada, e implementa o controle de *offset* em cada uma delas em sequência começando por aquela de maior prioridade.

Por último, o Sistema de Prioridade ao Transporte Público. Há duas maneiras utilizadas pelo TUC para favorecer os veículos de transporte público. A primeira delas apenas altera os pesos utilizados nos cálculos de forma a prover uma fluidez maior às rotas usadas por esses veículos. A segunda maneira, mais direta, atua diretamente na sinalização semafórica alterando o estado destas. Esta alternativa, porém, não pode ser empregada em malhas com muitas linhas se cruzando ou com uma alta frequência de veículos desse tipo. Isto se deve à impossibilidade de servir duas vias conflitantes ao mesmo tempo e também à dificuldade de modificar a todo instante o estado semafórico devido à frequente requisição de pedidos de prioridade. Após a identificação do veículo em questão o TUC concede a prioridade através da extensão do verde ou da repetição do estágio.

## 3.2 Conclusão

Neste capítulo foram revistas as principais técnicas de controle atuado de tráfego. Os sistemas SCOOT, PROLYN, OPAC e RHODES requerem estimativas de tamanho de fila (pelotões ou último veículo parado), enquanto que o sistema TUC realiza o controle diretamente a partir de dados de ocupação dos sensores, que são traduzidos em número de veículos no *link*.

Na capítulo a seguir, são mostradas as técnicas de modelagem de filas usadas por alguns dos algoritmos acima.

## Capítulo 4

# Modelos de Estimação de Filas

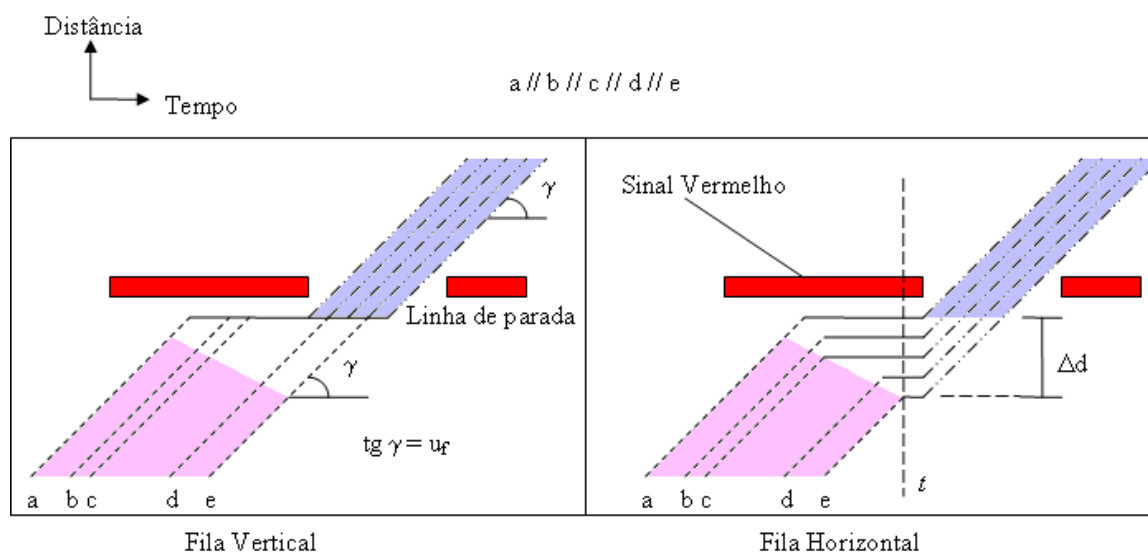
### 4.1 Introdução

Neste capítulo serão apresentados métodos de estimação de filas utilizados por alguns sistemas de controle em tempo real. Existe duas formas básicas de se modelar filas, uma delas é através de filas verticais e a outra através de filas horizontais.

Os modelos de filas verticais são assim chamados por não representarem o espaço físico ocupado pelos veículos, eles apenas retornam o número de veículos parados e seu atraso. Devido a sua simplicidade, o modelo de fila vertical já foi muito utilizado, porém, devido à necessidade de se modelar congestionamentos torna-se necessário o uso de um modelo de fila horizontal. Este, por sua vez, é capaz de modelar bloqueios, ou seja, o entupimento de uma via devido a uma grande quantidade de veículos na mesma, e também possibilita o emprego de coordenação semafórica de maneira mais correta. A Figura 4.1 ilustra as diferenças entre um modelo de fila vertical e horizontal. Observa-se que as áreas sombreadas nos gráficos de fila vertical e horizontal são correspondentes. As retas *a*, *b*, *c*, *d* e *e* representam a trajetória de veículos que se aproximam da linha de parada com velocidade de cruzeiro. Considera-se para este exemplo que as acelerações e desacelerações dos veículos são instantâneas.

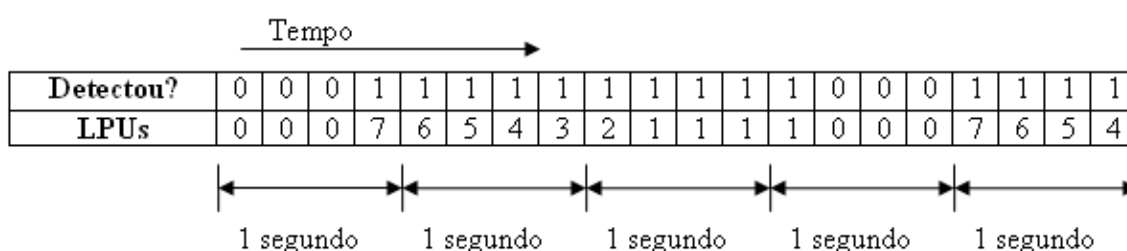
### 4.2 SCOOT

O SCOOT analisa o estado da via levando em consideração o fluxo ou o volume de veículos, e a ocupação do laço. Essa medida é dada em LPU (Link Profile Unit), e é calculada dependendo do



$\Delta d$  = Distância entre a linha de parada e o final da fila no instante de tempo  $t$

**Figura 4.1:** Equivalência entre o Modelo de Fila Vertical e o Modelo de Fila Horizontal



**Figura 4.2:** Exemplo de detecção e correspondente contagem em LPUs

histórico da detecção. A cada duzentos e cinquenta milissegundos (250ms) é feita a leitura do laço indutivo, e os pesos para cada intervalo são atribuídos da seguinte forma: quando o laço estiver livre é dado o peso de zero LPU. O primeiro intervalo em que o laço estiver ocupado após um intervalo de ociosidade, ganha 7 LPUs. O segundo consecutivo ganha 6 LPUs, e assim por diante até atingir 1 LPU ( sétimo intervalo ), mantendo este valor para os próximos intervalos caso o laço continuar ocupado [18]. A Figura 4.2 ilustra um exemplo onde o laço ultrapassa sete intervalos de ocupação.

Dessa forma, a medida em LPUs é função do fluxo de veículos, da velocidade, do comprimento dos veículos e da disposição física do laço na via. Ou seja, não existe uma equivalência fixa e matemática entre o número de veículos e o número de LPUs, uma vez que, a rigor, a equivalência entre as duas medidas varia de local para local e de momento para momento, dependendo do comportamento do tráfego em cada local e em cada momento. Em termos médios, pode-se considerar que

um veículo equivale a 17 LPUs.

Como não há uma equivalência fixa entre o número de veículos e a medida em LPUs, os detectores SCOOT não são apropriados para a contagem de veículos. Entretanto é possível obter uma estimativa aplicando um fator de correção, que pode ser obtido através de uma contagem confiável por outro meio, como a contagem manual por exemplo.

Todos os parâmetros de tráfego utilizados pelo SCOOT são expressos em LPU. O fluxo de saturação, por exemplo, é dado em LPU/s, e a fila em LPU.

Situações de congestionamento podem ser identificadas diretamente. Para tanto, o laço deve estar situado em uma posição tal que o fim da fila normal do semáforo, não alcance o laço. Logo, se o laço permanecer ocupado por um período muito grande significará que a aproximação está congestionada.

Para explicar como o SCOOT faz o modelamento de fila, apresenta-se um exemplo conforme a Tabela 4.1. Apesar da amostragem dos detectores ser realizada a cada quarto de segundo, o sistema utiliza como menor unidade de tempo o segundo, ou seja, é realizado uma somatória dos últimas 4 amostragens para se obter a contagem de um segundo.

IVL	OCC	Q	R/G
1	16	22	RRRR
2	18	40	RRRR
3	2	42	RRRR
4	16	58	RRRR
5	2	60	RRRR
6	16	66	RRRG
7	2	28	GGGG
8	18	4	GGGG
9	18	-18	GGGG
10	2	0	GGGR

**Tabela 4.1:** Histórico de fila e detecções hipotéticas do SCOOT [18]

onde:

IVL = intervalo de 4 segundos.

OCC = ocupação medida pelos detectores em LPU, já projetado pelo perfil cíclico para a linha de retenção, considerando-se o pelotão e a dispersão.

$Q$  = fila acumulada em LPU ( $Q = Q$  do intervalo anterior + OCC do intervalo atual, quando o semáforo está vermelho). Por exemplo:

$R/G = R$  (*Red*) vermelho e  $G$  (*Green*) verde: cada letra indica o estado do semáforo no intervalo de 1 segundo.

**Para o intervalo 2:  $Q = 22 + 18 = 40$  LPU**

Supondo que o fluxo de saturação seja de 10 LPU/s, ou seja, a cada segundo de verde é possível descarregar 10 LPUs, no intervalo 6 quando o semáforo abre o verde, a fila fica:

$$Q = 60 + 16 - 10 = 66$$

No intervalo 7:

$$Q = 66 + 2 - 4 \times 10 = 28$$

No intervalo 9, a fila fica negativa, indicando uma sobra de verde:

$$Q = 4 + 18 - 4 \times 10 = -18$$

No intervalo 10, o semáforo fecha e a fila é zerada.

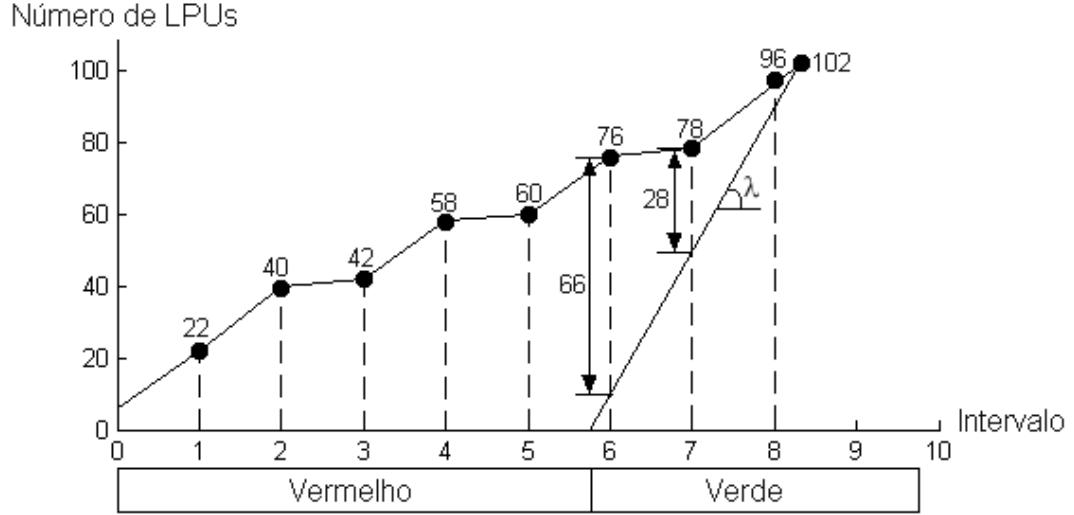
O número de paradas (em LPU) é igual a soma dos valores da coluna OCC quando o semáforo está no vermelho.

Com base nesse modelo de fila, o SCOOT constrói o *Vega Profile*, que nada mais é do que um gráfico que fornece informação a respeito da fila acumulada em função dos intervalos de tempo de 4 segundos. A Figura 4.3 representa o *Vega Profile* do exemplo anterior. Vale ressaltar também que a cada novo ciclo a fila é zerada, de modo a eliminar eventuais erros de estimação.

### 4.3 PRODYN

O PRODYN utiliza um modelo de fila vertical que pode ser considerado simples, porém eficiente [8]. São considerados instantes de tempo  $t$ , (tempo de amostra), espaçados de um período constante  $T$ , no caso 4 segundos. O fluxo de veículos em uma rede é modelado através de equações de estado. Há um grupo de equações de estados para intersecções que inicialmente descrevem a evolução da indicação semafórica [8]:

$$v^i(t+1) = u^i(t) \quad i = 1, 2, \dots, I \quad (4.1)$$



**Figura 4.3:** *Vega Profile*

onde  $v^i(t) \in \{0, 1\}$  é o estágio vigente na intersecção  $i$ ;  $u^i(t) \in \{0, 1\}$  é o valor do controle a ser aplicado no período subsequente na intersecção  $i$ ; e  $I$  é o número de intersecções no sistema. Quando o estágio está vigente na intersecção  $i$  no instante de tempo  $t$ , tem-se:  $v^i(t) = 1$ , e isto indica que o verde está sendo dado para a aproximação principal da intersecção  $i$ .

O tempo de vigência de um mesmo estágio, medido em termos de número de períodos sem mudança, é dado por:

$$w^i(t+1) = \begin{cases} w^i(t) + 1 & \text{se } u^i(t) = v^i(t) \\ 0 & \text{se } u^i(t) \neq v^i(t) \end{cases} \quad (4.2)$$

onde  $w^i(t)$  é o número de períodos decorridos no estágio vigente.

Outro grupo de equações de estado descrevem as variáveis que caracterizam as vias do sistema. O modelo vertical da fila, em uma via, tem evolução temporal dada por:

$$x^l(t+1) = \max\{0, x^l(t) + a_l^1(t) - s^l \times m^l(t)\} \quad (4.3)$$

onde  $x^l(t)$  é a fila formada na linha de parada na aproximação  $l$ ;  $a_l^1(t)$  é o número de veículos em velocidade livre que trafegam na primeira seção de uma via;  $s^l$  é o fluxo de saturação, isto é, a taxa média de descarga da fila, considerado conhecido e constante para todas as vias, e  $m^l(t) \in \{0, 1\}$  é

o controle da via em questão, sendo  $m^l(t) = u^i(t)$  para as vias arteriais e  $m^l(t) = \overline{u^i(t)}$  para as vias secundárias, onde  $\overline{u^i(t)}$  é o complemento de  $u^i(t)$ .

As seções de uma via são definidas por:

$$\mathcal{N}a = \frac{L}{vT} \quad (4.4)$$

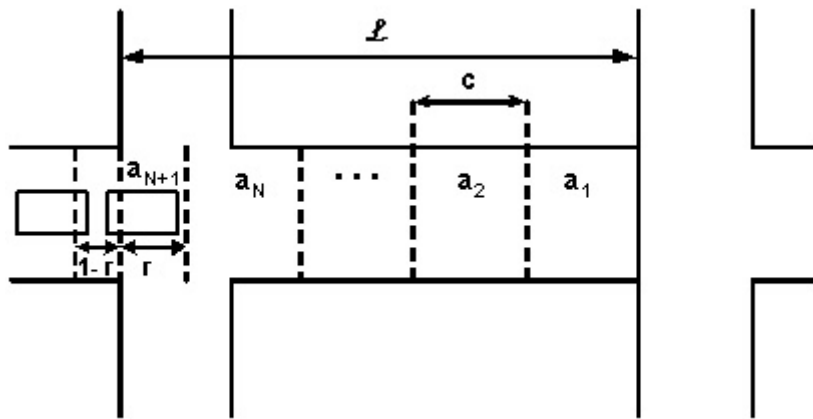
onde  $\mathcal{N}a$  é o número de seções de uma via;  $L$  é o comprimento da via;  $v$  é a velocidade livre de percurso; e  $T$  é o período.  $\mathcal{N}a$  é definido de tal forma que a passagem de uma seção para a seguinte é feita em exatamente um período amostral, como pode ser visto na Figura 4.4. A evolução da ocupação de veículos que trafegam em velocidade livre ao longo das seções de 1 a  $N$  de uma via, é dada por:

$$a_j^l(t+1) = a_{j+1}^l(t), j = 1, \dots, N-1 \quad (4.5)$$

$$a_{N(l)}^l(t+1) = a_{N(l)+1}^l(t) + (1-r^l)z^l(t) \quad (4.6)$$

$$a_{N(l)+1}^l(t+1) = r^l z^l(t) \quad (4.7)$$

onde  $z^l(t)$  é o fluxo de veículos no início da via, a montante da intersecção e  $N(l)$  é número de períodos que um veículo gasta para atravessar uma via, sendo  $N(l)$  a parte inteira e  $r^l$  a parte decimal deste período.



**Figura 4.4:** Seções de uma via de acordo com o modelo do PRODYN [8]

Os fluxos de veículos  $z^l(t)$  são modelados de duas formas. Uma delas é utilizada para vias alimentadas por filas a montante:

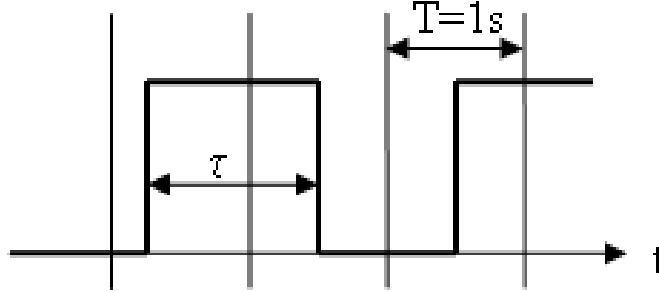


$$z^l(t) = \sum_{l'} p^{l'l} \{ \min[x^{l'}(t) + a_1^{l'}(t), s^{l'} * m^{l'}(t)] \} \quad (4.8)$$

onde  $l' \in U_l$ ,  $U_l$  é o conjunto das vias que alimentam uma determinada via  $l$ ;  $p^{l'l}$  é a proporção de veículos que convergem das filas para a via a jusante, considerada conhecida e constante. A outra é utilizada para as vias de entrada, onde  $z^l(t)$  é simplesmente o resultado da contagem veicular.

#### 4.4 Modelo de Fila Horizontal

Para este modelo, proposto por Gallego [10], a informação obtida pelo laço indutivo pode ser traduzida como  $\{Q_k, V_k = \frac{(l_v + l_b)}{\tau}\}$ .  $Q_k$  é o número de veículos que entraram na via durante o período  $k$  ( $Q_k \in \{0, 1\}$ , para pequenos tempos de amostragem), e se  $Q_k = 1$ ,  $V_k$  é a velocidade estimada do veículo detectado. A velocidade é calculada levando em conta a largura do laço indutivo  $l_b$ , o tamanho médio de um automóvel  $l_v$  e a duração da última detecção  $\tau$ , segundo mostra a Figura 4.5. O atraso



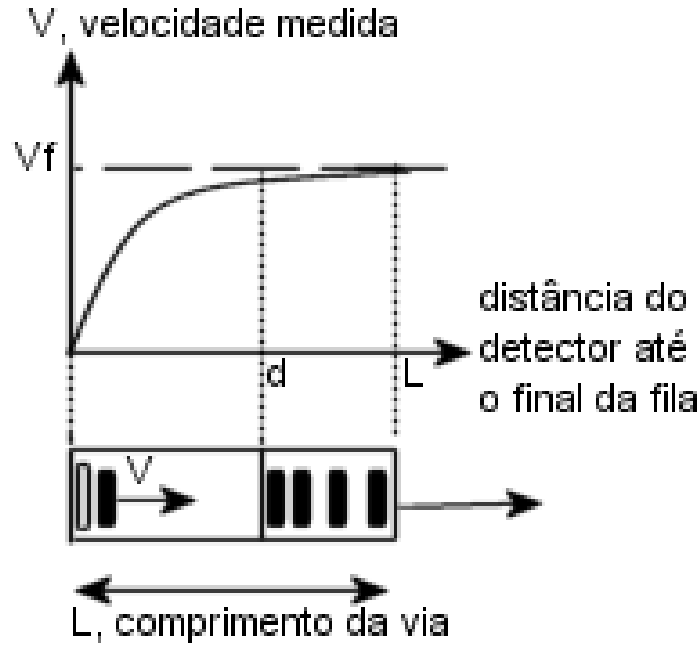
**Figura 4.5:** Dados de saída do detector

$\Delta T_{i,t}$  sofrido por um veículo  $i$  no tempo  $t$  durante o período  $T$  pode ser aproximado em primeira ordem por  $\Delta T_{i,t} = (1 - \frac{V_{i,t}}{V_f})$ , para  $V_f$  a velocidade de cruzeiro da via em questão, e  $V_{i,t}$  a velocidade do veículo  $i$  no tempo  $t$  ( $V_{i,t} < V_f$ ), o que confere um atraso total de  $\Delta T_i = \sum_{t=0}^{\infty} \Delta T_{i,t}$ .

$$V = V_f \left(1 - \frac{1}{d \cdot k_j}\right), \quad 0 < d < L \quad (4.9)$$

A velocidade na entrada da via está estatisticamente ligada à distância  $d$  entre o detector e o fim da fila. Quanto mais longa a fila menor, ou quanto mais próximo está o final da fila ao detector, menor a velocidade dos veículos que entram na via. Uma derivação do modelo macroscópico de Greenshield [14] foi usada para descrever a relação da Equação 4.9 ilustrada na Figura 4.6.

sendo  $k_j$  a concentração de veículos no congestionamento ( $\frac{1}{l_v}$ ),  $L$  a distância entre o detector e a linha de parada, e  $d$  a distância entre o detector e o final da fila.



**Figura 4.6:** *Velocidade  $\times$  tamanho da fila*

Para uma fila  $X$ , o seu comprimento é dado por  $D$  e seu cálculo é baseado na suposição de que a fila apresenta no máximo duas zonas de concentração diferentes ( $k_m$  e  $k_j$ ) separadas por uma onda de choque. Esta onda de choque apresenta velocidade  $u_D$  caso o semáforo esteja verde e  $u_A$  caso o semáforo esteja vermelho.

Seja  $u_k$  o sinal de controle no período  $k$ . Se  $u_k$  foi aplicado durante  $\tau_k$  segundos, o comprimento  $D$  da fila pode ser expresso como:

- Se  $u_k = 1$  (sinal verde) então:

se  $u_D \tau_k > \frac{X}{k_j \alpha}$  então:

$$D = \frac{X}{k_j \alpha} \quad (4.10)$$

senão:

$$D = \frac{X}{k_j} + u_D \tau_k (1 - \alpha) \quad (4.11)$$

- Senão (sinal vermelho):

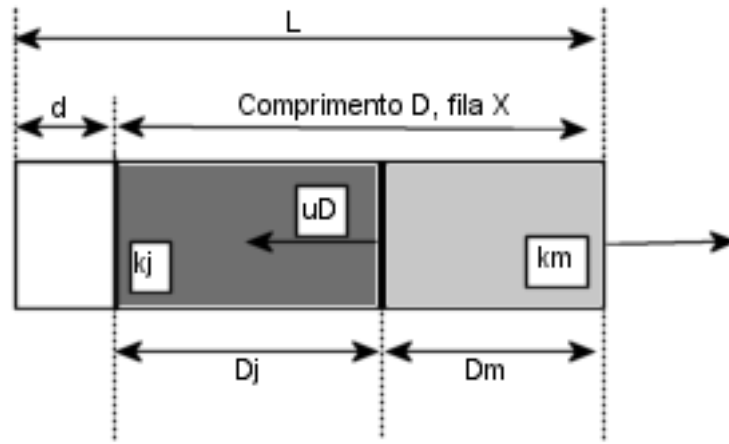
se  $u_A \tau_k > X$  então:

$$D = \frac{X}{k_j} \quad (4.12)$$

senão:

$$D = \frac{X}{k_j \alpha} - u_A \tau_k \left( \frac{1}{\alpha} - 1 \right) \quad (4.13)$$

onde  $u_A$  e  $u_D$  são as velocidades das ondas de choque de formação e de extinção de fila, respectivamente, e  $\alpha$  uma constante. O que fornece quatro possíveis configurações de fila (4.10, 4.11, 4.12, 4.13). As Equações de 4.14 a 4.19 mostram o desenvolvimento de 4.11, ilustrado pela Figura 4.7.



**Figura 4.7:** Onda de choque

$$X = \sum_{i \in V_t} \left( 1 - \frac{V_{i,t}}{V_f} \right) \quad (4.14)$$

$$= k_m D_m \left( 1 - \frac{V_m}{V_f} \right) + k_j D_j \left( 1 - \frac{V_j}{V_f} \right) \quad (4.15)$$

$$= k_m u_D \tau_k \left( 1 - \frac{V_m}{V_f} \right) + k_j (D - u_D \tau_k) \quad (4.16)$$

$$\Rightarrow D(X, u_k, \tau_k) = \frac{X}{k_j} + u_D \tau_k \left( 1 - \frac{k_m}{k_j} \left( 1 - \frac{V_m}{V_f} \right) \right) \quad (4.17)$$

$$= \frac{X}{k_j} + u_D \tau_k (1 - \alpha) \quad (4.18)$$

com

$$\alpha = \frac{k_m}{k_j} \left(1 - \frac{V_m}{V_f}\right) \quad (4.19)$$

Para valores conhecidos de  $X$ ,  $\tau_k$  e  $u_k$ ,  $D$  pode ser calculado. Então,  $d$  ( $d = L - D$ ) pode ser usado no modelo de Greenshield para obter a velocidade esperada de qualquer veículo entrando na seção da via [10].

Para complementar este modelo de fila, foi implementado um filtro de forma a tornar o modelo estocástico. A característica estocástica do problema e sua não linearidade impedem o uso de soluções clássicas como mínimos quadrados recursivo ou filtros de Kalman, então a solução mais adequada foi a utilização da Regra de Bayes.

Para implementar a Regra de Bayes, o estado da fila foi discretizado em  $N + 1$  valores possíveis  $0, 1, 2, \dots, N$ . O estado da fila é descrito por um vetor de distribuição de estados da fila:

- $Y = X_{0|-1}, V_{t0}, V_{t1} \dots$  é o histórico até o momento " $l$ " com o estado inicial dado pela distribuição  $X_{0|-1}$ ;
- $X_{k|l}^i = P(X_k = i | Y_l)$  é a probabilidade para o estado da fila ser " $i$ " no tempo " $k$ " dado " $Y_l$ ".

A Regra de Bayes permite a correção da distribuição da fila depois de uma observação:

$$X_{k|k}^i = \frac{P(V_k) | X_k = i) X_{k|k-1}^i}{P(V_k | Y_{k-1})} \quad (4.20)$$

Se a amostra " $k$ " não apresenta uma observação, então,  $X_{k|k}^i$  e  $X_{k|k-1}^i$  têm o mesmo valor.

## 4.5 TUC

O TUC já parte da prerrogativa de que não é possível obter dados reais a respeito das filas a partir das informações dos laços indutivos. Supõe-se que apenas uma noção das condições de tráfego ao redor do detector pode ser obtida. Através das leituras de ocupação pode-se afirmar que:

- valores baixos de ocupação indicam que o final da fila está em algum lugar a jusante do detector, neste caso, a ocupação fornece o fluxo de entrada do *link*;
- valores médios de ocupação indicam que o final da fila está próximo, ou ao redor do detector;

- valores altos de ocupação indicam que o final da fila está a montante do detector.

Como forma de investigar essas características e de se formalizar uma métrica capaz de transformar as medidas de ocupação em número de veículos no *link* foi utilizado um simulador, o METACOR. Uma série de experimentos foi realizada variando-se a posição do detector sob certas condições de fluxo e semaforização chegando-se então ao seguinte resultado heurístico [6]:

- para valores baixos de ocupação:
  - se o detector estiver localizado perto da linha de parada, o número de veículos é baixo;
  - se o detector estiver localizado ao redor do centro do *link*, o número de veículos pode ser baixo ou médio;
  - se o detector estiver localizado próximo à entrada do *link*, o número de veículos pode ser baixo, médio e até mesmo alto, já que o final da fila está em qualquer lugar a jusante do detector.
- para valores médios de ocupação:
  - se o detector estiver localizado perto da linha de parada, o número de veículos é baixo;
  - se o detector estiver localizado ao redor do centro do *link*, o número de veículos é médio;
  - se o detector estiver localizado próximo à entrada do *link*, o número de veículos é alto.
- para valores altos de ocupação:
  - se o detector estiver localizado perto da linha de parada, o número de veículos pode ser baixo, médio e até mesmo alto;
  - se o detector estiver localizado ao redor do centro do *link*, o número de veículos pode ser de médio a alto;
  - se o detector estiver localizado próximo à entrada do *link*, o número de veículos é alto.

Constatou-se então que não há uma relação de um para um entre o número de veículos e o valor médio de ocupação no *link*. Porém, uma relação de um para um pôde ser encontrada considerando-se para cada média de ocupação a média de todos os valores médios correspondentes do número de veículos. Seguindo esta idéia, resultam os diagramas da Figura 4.8 que representam a média do número de veículos que se espera encontrar no *link* para uma dada ocupação. Para cada um desses

diagramas traça-se a melhor curva que representa a tendência dos pontos, e que pode ser aproximado através das curvas da Figura 4.9.

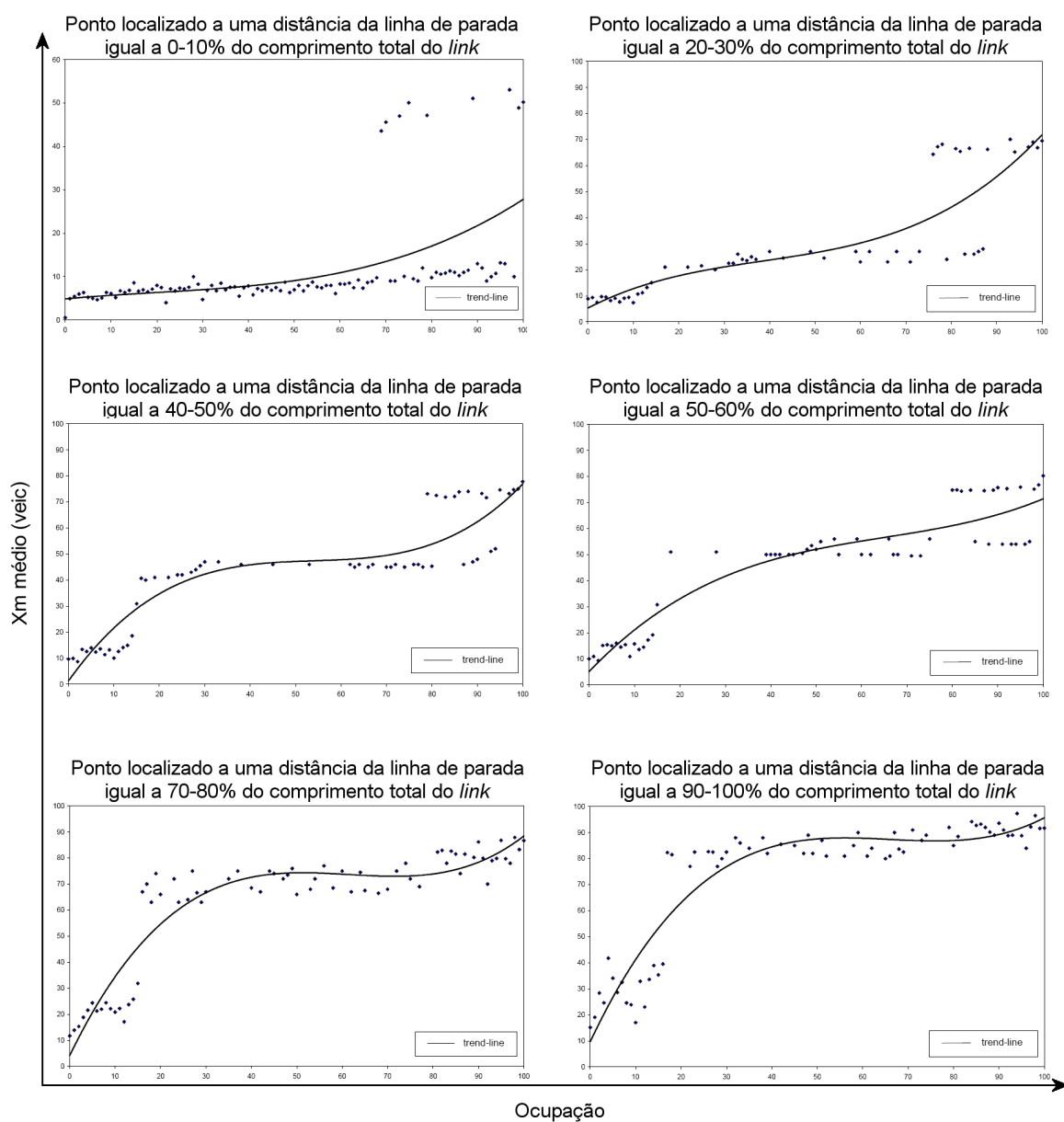
Observando as curvas da Figura 4.9, busca-se encontrar uma família de funções não-lineares, que dado os valores de ocupação, possa-se determinar aproximadamente o número correspondente de veículos presentes no *link* considerado, dependendo da posição do detector. Assumindo que tal família é encontrada para determinado *link*, então, o número de veículos  $x_z$ , encontrados em uma determinada via  $z$ , pode ser aproximado por uma relação da forma:

$$x_z = \frac{x_{z,máx}}{100} f_z(o_z) \quad (4.21)$$

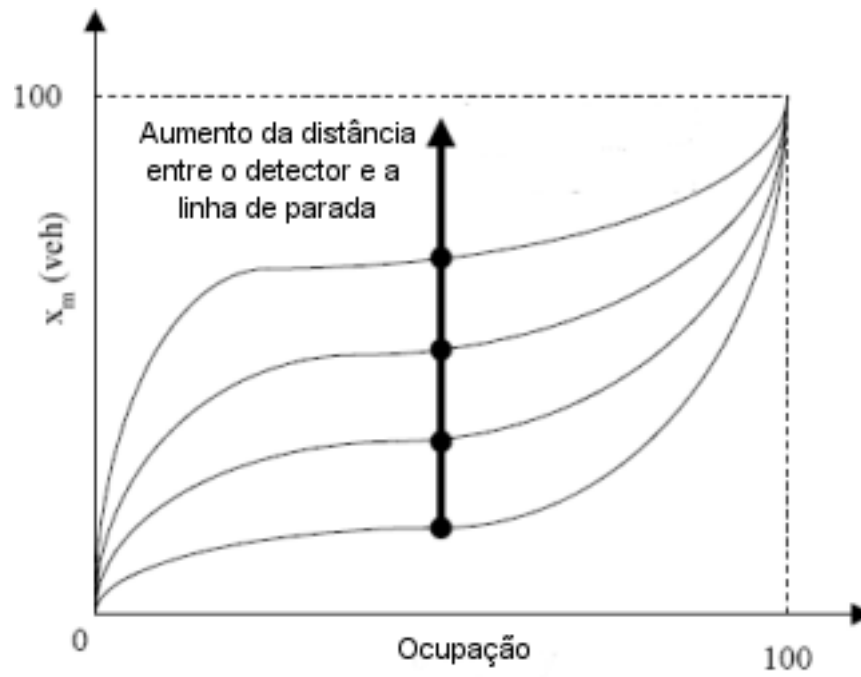
onde  $x_{z,máx}$  é o número máximo de veículos comportado pelo *link*, e  $f_z(o_z)$  é a função que estima o número de veículos dada a posição do detector na via e a ocupação. A Figura 4.10 mostra a família de curvas gerada pela função  $f_z(o_z)$  dependendo dos valores de  $l_z$ , ou seja, a posição do detector em relação ao comprimento total do *link*.

## 4.6 Conclusão

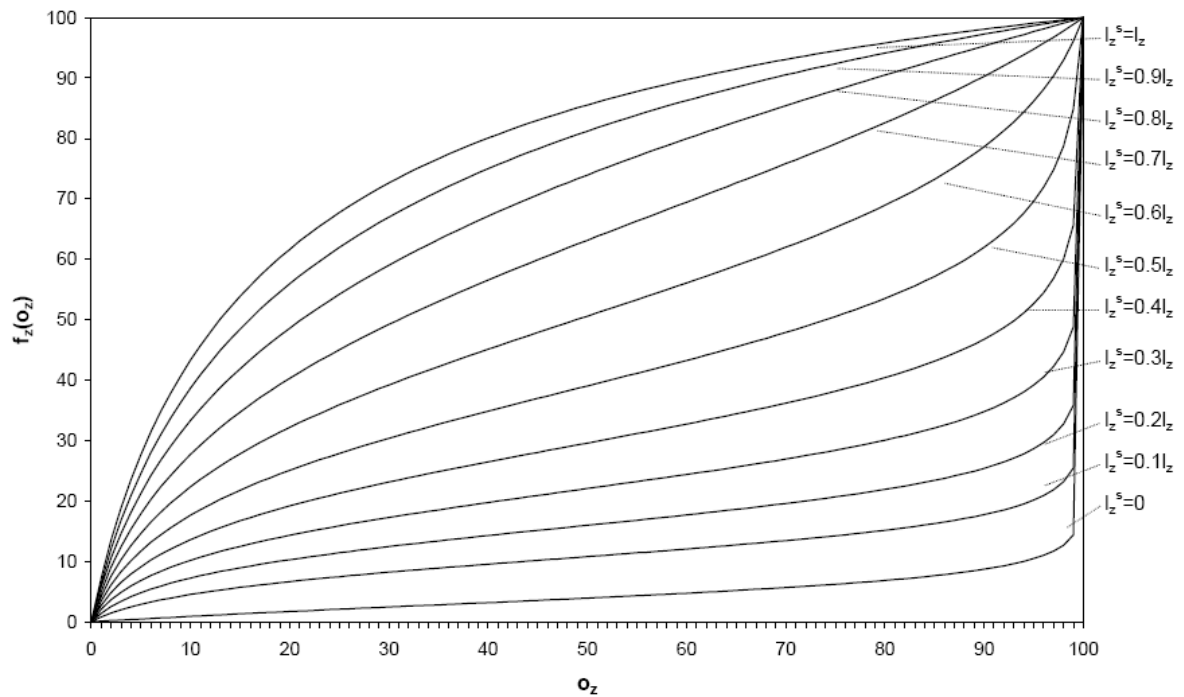
Neste capítulo foram apresentados modelos dinâmicos de filas empregados em alguns dos sistemas de controle de tráfego apresentados no capítulo anterior. O seguinte capítulo irá apresentar o objetivo deste estudo, que é uma proposta para um modelo de dinâmica de filas que busca melhor refletir o funcionamento do sistema.



**Figura 4.8:** Relação de número médio de veículos e ocupação para diferentes posições no link [6]



**Figura 4.9:** Representação simplificada da relação entre a ocupação e o número de veículos para diferentes posições do detector [6]



**Figura 4.10:** Família de curvas para  $f_z(o_z)$ , sendo  $l_z$  o comprimento total da via, e  $o_z$  a ocupação [6]



## Capítulo 5

# Modelo Proposto

### 5.1 Introdução

Os modelos de fila apresentados no capítulo anterior são aplicáveis em situações nas quais apenas duas regiões de concentração existem: veículos parados ( $k = k_j$ ), concentração de congestionamento), seja na linha de parada ou ao final de uma fila; e veículos em movimento. Porém, em situações particulares pode ocorrer o surgimento de três ou mais regiões de concentração, como por exemplo quando o sinal está aberto, e há um bloco de veículos parados no meio da via, veículos chegando ao final da fila, e veículos partindo à frente da fila.

A estimação de filas em tráfego é há bastante tempo discutida encontrando-se trabalhos já em 1979, com os estudos de Baras [1] e [2]. Uma preocupação que sempre existiu é a questão da complexidade dos modelos, já que um modelo muito complexo impede seu uso em sistemas com várias aproximações, devido à grande quantidade de cálculos necessários para se realizar em um espaço de tempo limitado. Mesmo com o avanço da tecnologia e o aumento da capacidade de processamento este fator ainda pesa na hora da concepção. Uma solução viável atualmente para esse problema é a distribuição do processamento, transferindo os cálculos do sistema de controle para o próprio dispositivo de detecção, porém, esta alternativa não resolve totalmente o problema quando a predição das filas está envolvida nos cálculos de controle. Sistemas como PRODYN, OPAC, RHODES e até mesmo o SCOOT necessitam de um modelo de dinâmica de filas, mesmo que simplificado, para operar seus algoritmos. Não bastando simplesmente a obtenção do estado das filas correntes. Pode-se dizer que a proposta aqui apresentada tem uma complexidade relativamente baixa, não apresentando limitações para uma rede comum, composta de 20 intersecções.

## 5.2 Proposta

A análise dos modelos existentes e dos requisitos de controle direcionou a construção de um modelo de fila que fosse capaz de fornecer o atraso sofrido pelos veículos, a posição do final da fila, e que pudesse ser utilizado em um algoritmo de tempo real para controle de tráfego. Em situações de sobre-saturação pode ser observado a existência de múltiplas ondas de choque ao longo de uma mesma aproximação. Este fenômeno é reproduzido pelo modelo, o que implica na geração de múltiplas filas, e no gerenciamento das mesmas.

Como forma de simplificação, o modelo possibilita apenas 2 estados para os veículos. Ou eles estão em movimento, com velocidade igual à velocidade livre da via ( velocidade de cruzeiro), ou eles estão parados. Dessa maneira, toda vez que um veículo for considerado parado, a contabilização do atraso se dá sem considerar a desaceleração ou retomada de velocidade.

Seguindo esta idéia pode-se visualizar a seguinte situação, descrita na Figura 5.1. Ela representa um caso de sobre-saturação da via, onde coexistem algumas filas, sendo formadas e sendo extintas devido à mudança de estado do semáforo. A cada mudança de verde para vermelho, ou de vermelho para verde, ondas de choque são formadas criando diferentes zonas de compressão e expansão ao longo da via. O tamanho da fila é dado em metros (considerando um tamanho médio de cada veículo) e o tempo em segundos. Assim, o atraso acumulado é obtido através do somatório das áreas em cinza ( $[área] = [veic \times s]$ ), e o atraso médio é dado por:

$$\bar{a} = \frac{A}{N_v} \quad (5.1)$$

onde:

$A$  = área sob a curva;

$N_v$  = número de veículos.

O modelo proposto pode parecer um pouco pesado se for levado em conta o número de filas que eventualmente deve ser capaz de gerenciar, pois existe a possibilidade de haver mais de uma fila por aproximação. Porém, como as filas intermediárias têm as mesmas propriedades, como taxa de crescimento e de extinção, basta manter um histórico dos tempos de verde e de vermelho ocorridos entre o tempo atual e o início da última fila. Como a indicação semaforica atual sempre é conhecida, basta reconstruir as filas a partir destes dados.

Seguindo a idéia de que os veículos estão ou em velocidade de cruzeiro ou parados, pode-se calcular o tempo necessário para que um veículo recém detectado encontre o final da fila. Ou seja,

quanto maior a fila, menor o tempo para se chegar ao final dela. Este cálculo é realizado apenas para a fila mais antiga, sendo que a transferência de veículos entre as filas intermediárias se faz através do débito de veículos descarregados durante o tempo de verde. Observando a Figura 5.1, é possível identificar a fila mais antiga até o instante  $t_1$  como sendo a *Fila 1*, e a fila intermediária até este mesmo instante como sendo a *Fila 2*. A idéia de idade da fila está relacionada à formação do bloco de veículos parados e não à chegada de veículos ao bloco. Por esta razão, a fila mais antiga corresponde sempre ao bloco de veículos parados que está mais afastado da linha de parada, ou mais próximo à entrada da via. A fila mais antiga será referenciada como sendo a fila principal. Toda vez que a fila principal se extingue a fila intermediária mais próxima torna-se a fila principal vigente.

Ainda na Figura 5.1 é possível identificar quatro pontos importantes a serem destacados:

- **Coordenada  $a$ :** indica a posição do final da *Fila 1* no instante de tempo  $t_1$ ;
- **Coordenada  $b$ :** indica a posição da frente da *Fila 1* no instante de tempo  $t_1$ ;
- **Coordenada  $c$ :** indica a posição do final da *Fila 2* no instante de tempo  $t_1$ ;
- **Coordenada  $d$ :** indica a posição da frente da *Fila 2* no instante de tempo  $t_1$ .

Para um melhor entendimento do processo de carga e descarga de filas serão discutidos os seguintes cenários:

- **cenário 1:** Presença de uma única fila, que é completamente servida durante o tempo de verde. Esta é a situação mais básica de todas e permite que todos os veículos em fila atravessem a linha de parada, assim como pode ser visto na Figura 5.2.

O processo de formação da fila se dá de acordo com o perfil de chegadas dado pelo detector veicular presente na entrada do *link*. A cada instante de tempo a posição do final da fila é atualizada de acordo com este perfil. Toda vez que uma fase de verde entra em vigência é iniciado o processo de extinção da fila que se dá à taxa do fluxo de saturação da via. Este processo só é encerrado quando a frente da fila encontra o final dela, ou seja, a fila se extingue.

- **cenário 2:** Presença de uma única fila, que apesar de ser extinta durante o tempo de verde não permite que todos os veículos sejam descarregados.

Neste ponto faz-se necessário explicar como é feito o cálculo para determinar o número de veículos capazes de cruzar a linha de parada. Neste caso, a fila se extinguirá antes da troca de fase, e por isso o valor da última posição da fila  $B'$  é guardado. A solução é geométrica,

bastando determinar o ponto  $F'$  de encontro entre as retas 1 e 2, indicadas na Figura 5.3 e descritas por:

$$R_1 = q_s l_v (t - t_0) \quad (5.2)$$

$$R_2 = -V_c (t - t_v) \quad (5.3)$$

onde:

$q_s$  - fluxo de saturação da via veic/s;

$l_v$  - tamanho médio de um veículo m;

$V_c$  - velocidade de cruzeiro da via m/s.

Como o que se busca é a altura do ponto  $F'$  ( $F'_y$ , ou seja, a coordenada  $y$  do ponto), pode-se eliminar o tempo das Equações 5.2 e 5.3 utilizando as seguintes substituições:

$$v_d = t_v - t_0 \quad (5.4)$$

$$t_0 = 0, \quad (5.5)$$

e obtendo assim:

$$R_1 = q_s l_v t \quad (5.6)$$

$$R_2 = -V_c (t - v_d) \quad (5.7)$$

Fazendo  $R_1 = R_2$  encontra-se o instante de tempo  $t'$ :

$$t' = \frac{V_c v_d}{V_c + q_s l_v} \quad (5.8)$$

Assim, o ponto de encontro  $F'$  pode ser obtido por qualquer uma das equações de reta acima, 5.6 ou 5.7, substituindo o valor de  $t$  por  $t'$ , resultando em:

$$F'_y = q_s l_v \frac{V_c v_d}{V_c + q_s l_v} \quad (5.9)$$

Como o valor máximo alcançado pela fila  $B'$  foi guardado, resta comparar os dois valores e determinar se o tempo de verde foi suficiente ou não para descarregar toda a fila. Caso não tenha sido possível descarregá-la totalmente, os veículos serão adicionados à nova fila à taxa do fluxo de saturação da via, como mostra a Figura 5.3, até que atinjam o valor dado por:

$$B_y'' = \max(0, B_y' - F_y') \quad (5.10)$$

- **cenário 3:** Formação de mais de uma fila. De acordo com o modelo proposto as filas intermediárias crescem com taxa igual à do fluxo de saturação e se desfazem também à esta mesma taxa, como pode ser visto na Figura 5.1. Quando a fila principal se extingue ela automaticamente recebe as características da fila intermediária que segue, mantendo assim a dinâmica do sistema. O método utilizado para calcular a nova posição da fila principal é o mesmo explicitado anteriormente. O único diferencial é que se torna necessário calcular a nova posição da frente de onda,  $F''$ . Observando a Figura 5.4 temos:

$$\begin{aligned} F_y &= q_s l_v (a + b + c + d + e + f) \\ F_y'' &= q_s l_v (c + d + e + f) \\ \implies F_y'' &= F_y - q_s l_v (a + b) \end{aligned} \quad (5.11)$$

$$\begin{aligned} e \\ B_y''' &= F_y - q_s l_v a \end{aligned} \quad (5.12)$$

lembrando que para o cálculo de  $F_y'$  na Equação 5.9 e  $B_y''$  na Equação 5.10 tem-se que  $v_d = a$  na Figura 5.4. Para a situação ilustrada na Figura 5.5,  $F''$  é nulo, pois a extinção da fila principal se deu durante o vermelho e só havia uma única fila intermediária.

Até este ponto mostrou-se que o modelo retorna diretamente a posição do final fila principal, dado por  $B(t)$  e ilustrado na Figura 5.6, que é uma decomposição da Figura 5.4. Resta explicitar como é feita a contagem do atraso sofrido pelos veículos. No caso da presença de uma única fila, a principal, este cálculo é bastante direto e consiste na extração da área em cinza, vista na Figura 5.7, que nada mais é do que uma somatória no tempo da subtração dos valores de  $B(t)$  por  $F(t)$ , multiplicado pelo passo da amostragem:

$$Atraso = \sum_t (B(t) - F(t)) \Delta t \quad (5.13)$$

Já para o caso de múltiplas filas utiliza-se a informação a respeito da duração dos tempos de vermelho das filas secundárias para se determinar a área desejada. Por ser um modelo discreto no tempo, representa-se o incremento na forma de um degrau, o que gera o formato retangular de cada passo de iteração, como pode ser visto na Figura 5.8.

As áreas  $A'$ ,  $A''$ ,  $B'$  e  $B''$  são calculadas da seguinte forma:

$$\text{Área} = T_{vm} q_s l_v \Delta t \quad (5.14)$$

sendo  $T_{vm}$  o tempo de vermelho e  $\Delta t$  o tempo entre amostragens. A diferença que se busca ressaltar entre os dois casos é fato de no *Caso 1* o tempo de vermelho,  $T_{vm}$ , para o cálculo de  $A'$  ser um tempo parcial pelo fato da fase ainda não ter se encerrado. Já no *Caso 2*, e para a área  $B'$ ,  $T_{vm}$  ser integral.

### 5.3 Análise para Manutenção de Duas Filas

Uma análise baseada no fenômeno de formação de múltiplas filas, foi realizada para determinar quais seriam as condições de formação e manutenção de um cenário composto por duas filas, a principal e uma secundária, durante um ciclo ou parte dele, supondo ciclo e *split* constantes. Esta análise é interessante para futuros projetos de leis de controle que busquem garantir que no máximo duas filas possam ser formadas, ou seja, limitando o número de paradas em 2 para um mesmo veículo. Também, a análise poderá vir a auxiliar o reconhecimento da formação do fenômeno em estratégias de controle de tempo real.

A primeira condição deve garantir que após o término de um ciclo uma fila secundária seja formada:

$$q_{cm}(v_m + v_d) > q_s v_d, \quad (5.15)$$

onde:

$q_s$  - fluxo de saturação da via [veículos/s]

$q_{cm}$  - taxa de chegada média de veículos no *link* [veículos/s]

$v_d$  - tempo de verde do ciclo [s]

$v_m$  - tempo de vermelho do ciclo [s]

$$Ciclo = v_d + v_m [s]$$

A segunda condição a ser satisfeita impede que uma terceira fila seja formada, ou seja, a fila principal deve ser extinta até no máximo o término do segundo ciclo:

$$2q_{cm}(v_m + v_d) < q_s(v_d + v_m + v_d) \quad (5.16)$$

Essas foram as condições iniciais. As condições de regime garantem a manutenção das duas filas. A terceira condição garante que o que restou da fila principal, mais as novas chegadas no ciclo sejam suficientes para que a segunda fila seja formada:

$$q_s Y + q_{cm}(v_m + v_d - Y) > q_s v_d, \quad (5.17)$$

$$0 < Y \leq (v_m + v_d)$$

A quarta condição impede que uma terceira fila seja formada:

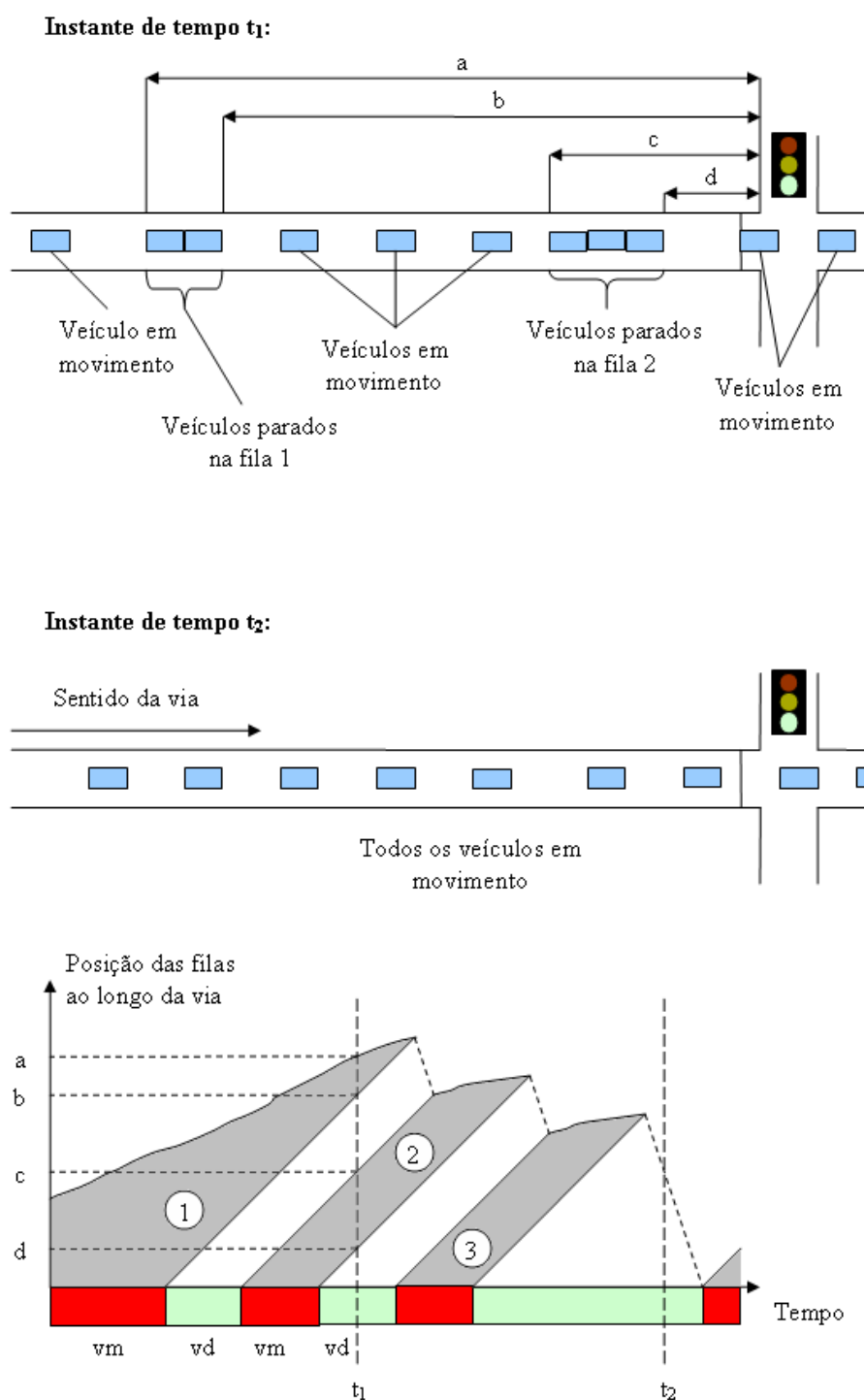
$$q_s Y + q_{cm}(v_m + v_d - Y) + q_{cm}(v_m + v_d) < q_s(v_d + v_m + v_d), \quad (5.18)$$

$$0 < Y \leq (v_m + v_d)$$

## 5.4 Conclusão

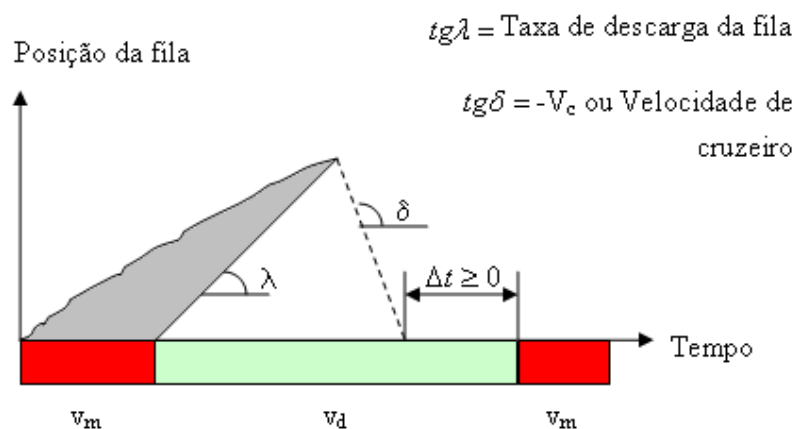
O modelo apresentado difere dos demais pois é capaz de modelar um efeito comum do tráfego, que é a existência de mais de duas regiões distintas de concentração causadas em situações de maior intensidade de tráfego.

No capítulo que segue, serão detalhadas algumas características da implementação do modelo, assim como os resultados das simulações realizadas para a validação do mesmo.

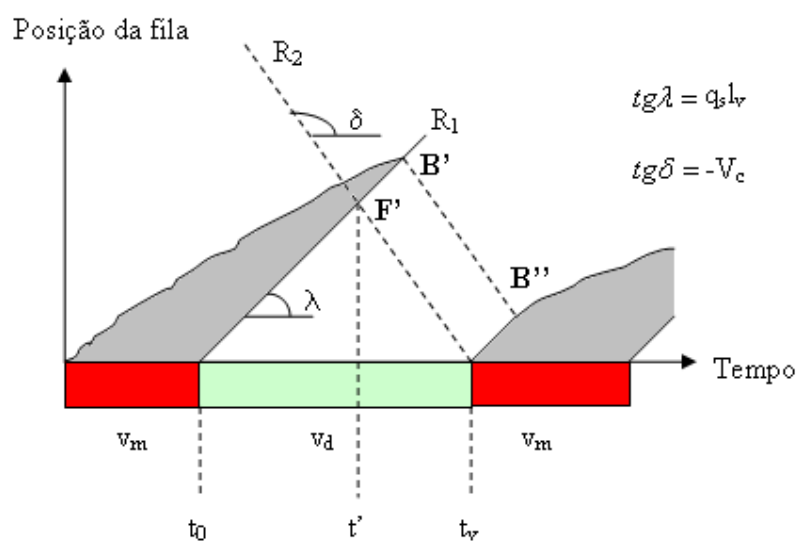


**Figura 5.1:** Filas em vias sobre-saturadas

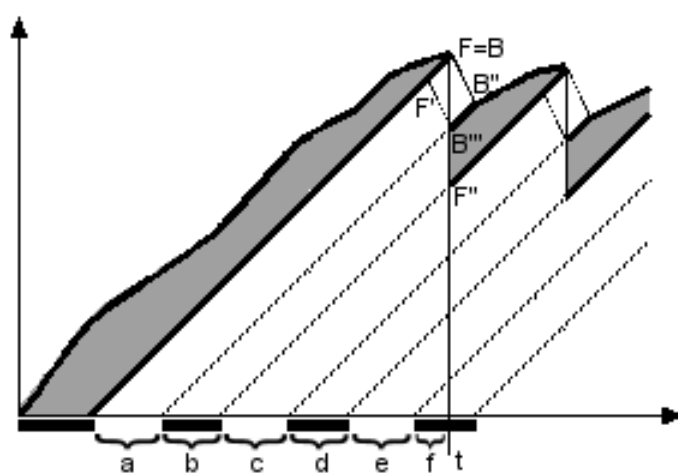




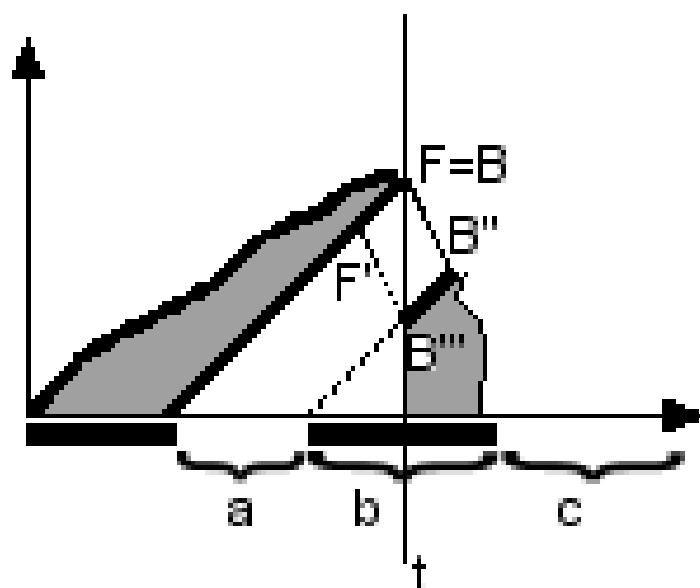
**Figura 5.2: Cenário 1**



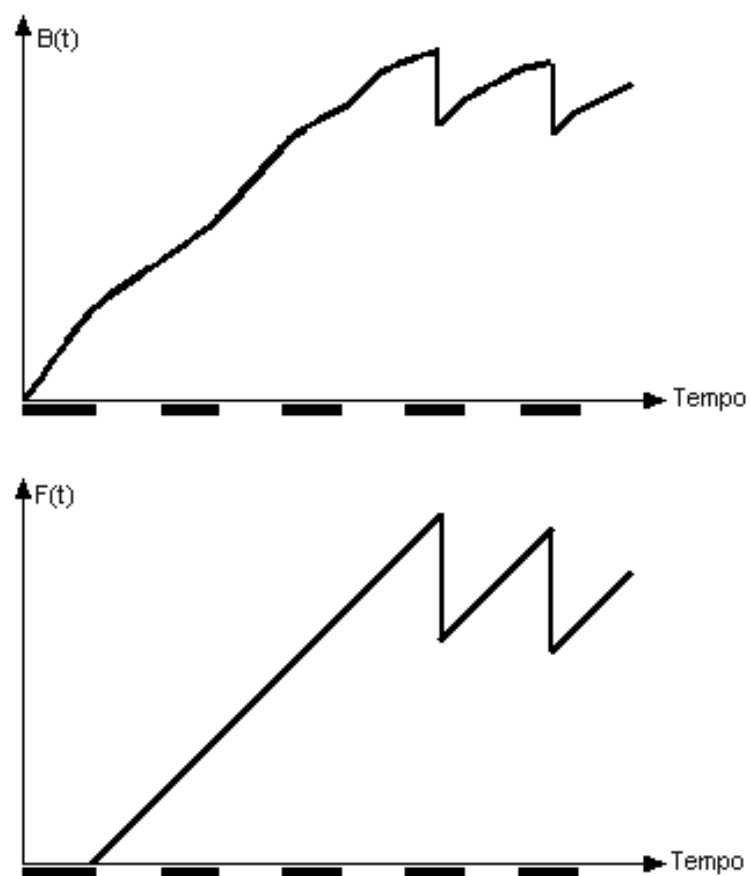
**Figura 5.3: Cenário 2**



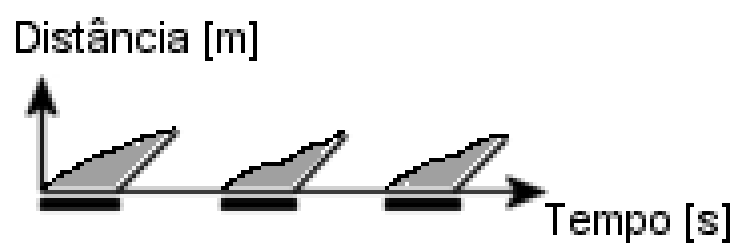
**Figura 5.4: Formação de múltiplas filas antes do cruzamento**



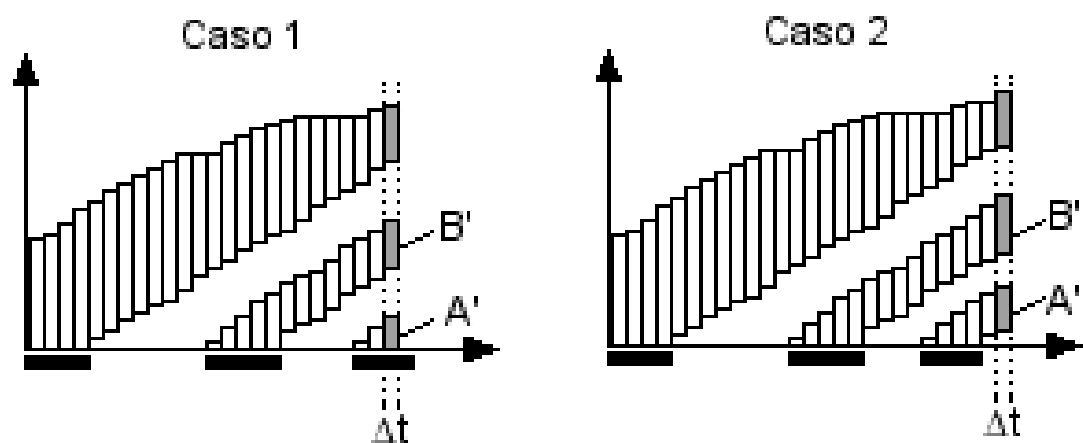
**Figura 5.5:** Formação de uma única fila secundária



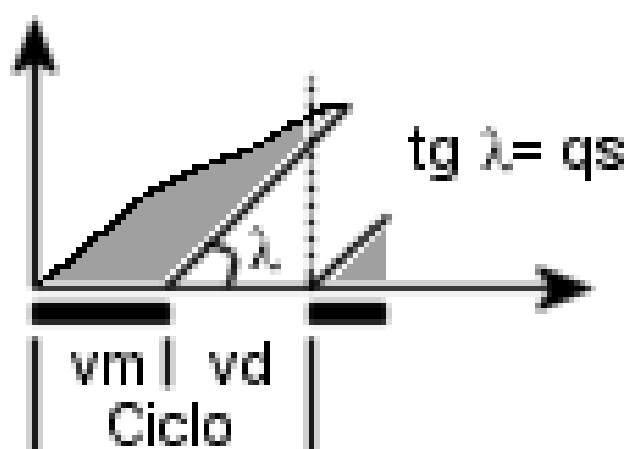
**Figura 5.6:** Gráficos do final e da frente da fila principal



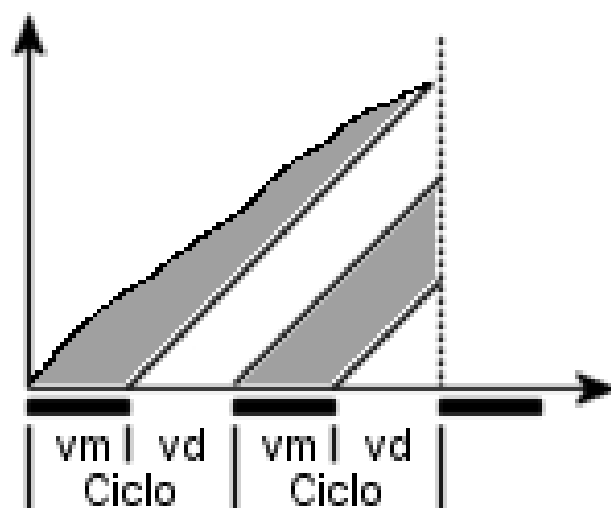
**Figura 5.7:** *Evolução das filas; área em cinza representa o atraso total*



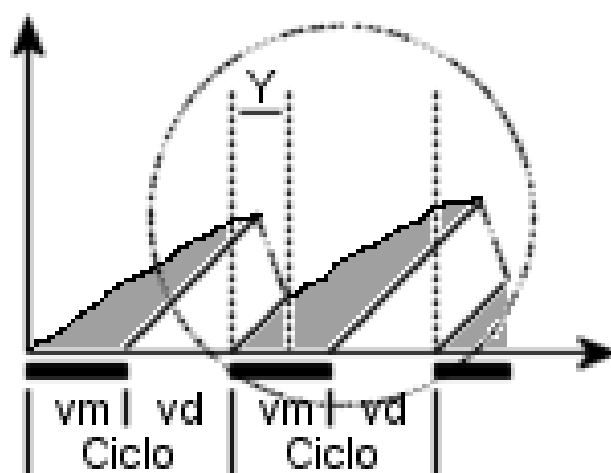
**Figura 5.8:** *Quantificação do atraso no modelo de filas adotado*



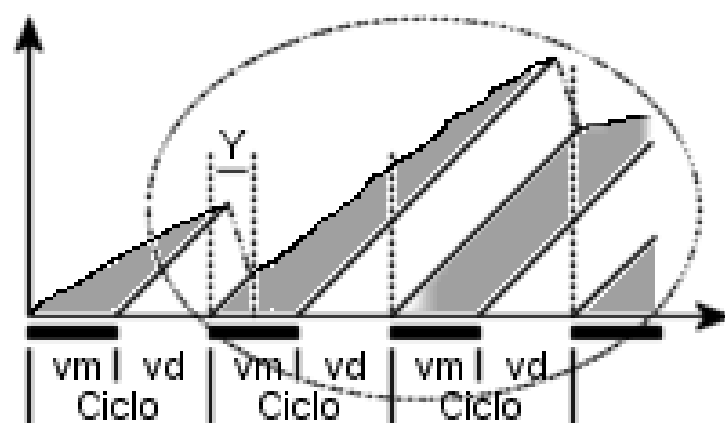
**Figura 5.9:** *Primeira Condição, formação da segunda fila*



**Figura 5.10:** Segunda Condição, manutenção de apenas duas filas



**Figura 5.11:** Terceira Condição, formação da segunda fila



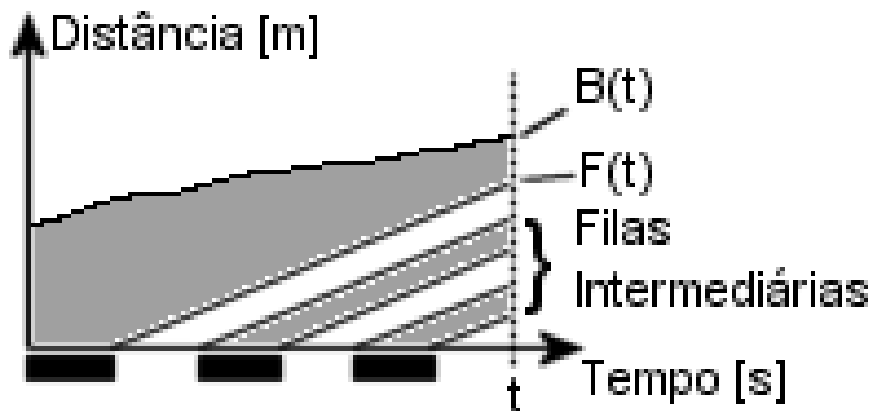
**Figura 5.12:** Quarta Condição, manutenção de apenas duas filas

## Capítulo 6

# Implementações e Resultados

### 6.1 Implementação

Seguindo o modelo proposto, duas variáveis específicas foram reservadas para guardar os valores de final de fila,  $B$ , e começo de fila,  $F$ . Observe que para o caso de múltiplas filas em uma mesma aproximação, os valores dessas duas variáveis representam as características da fila principal, como pode ser observado na Figura 6.1.



**Figura 6.1:** Final e Frente da Fila Principal

O vetor  $B(t)$ , final da fila, é atualizado a cada novo período de amostragem baseado na leitura dos dados do detector veicular e da indicação semafórica. Da mesma forma, os dados provenientes do detector (número de veículos) são guardados em um vetor, designado  $q_a$ , para cada período de amostragem, ilustrado na Figura 6.2. O tempo gasto pelo veículo para chegar ao final da fila, é utilizado para defasar no tempo o vetor de chegadas e determinar o número de veículos a serem

adicionados à fila. Ou seja, um veículo detectado num determinado instante só será adicionado à fila após  $\tau$  segundos, onde  $\tau$  é o tempo de viagem entre o detector e o final da fila.

Devido ao fato do tempo de viagem  $\tau$  ser arredondado, como mostra a Equação 6.2 (operadores  $\lceil$  e  $\rceil$  de arredondamento para cima), e da própria variação do tamanho da fila, pode acontecer de alguns veículos não serem contabilizados. Esse arredondamento é realizado pois o tempo é utilizado como índice do vetor  $B$ , o que implica na utilização de um valor inteiro. Por exemplo, dado o final da fila a 63 metros da linha de parada, o tempo atual em  $1234s$ , o tamanho da aproximação  $L = 100m$ , a velocidade de cruzeiro  $V_c = 12m/s$ , a chegada de três veículos no instante  $t = 1231s$ , e o comprimento médio de veículo de  $l_v = 4m$ . Então:

$$B(t) = B(t-1) + q_a(t-\tau) \times l_v \quad (6.1)$$

$$\tau = \lceil \frac{(L - B(t-1))}{V_c} \rceil \quad (6.2)$$

$$\tau = \lceil \frac{100 - 63}{12} \rceil$$

$$\tau = \lceil 3,08333 \rceil$$

$$\tau = 4$$

$$\implies q_a(1234 - 4) = q_a(1230)$$

onde  $q_a(\cdot)$  é um elemento do vetor de amostras do contador veicular.

No instante seguinte,  $t = 1235$ , resultando em:

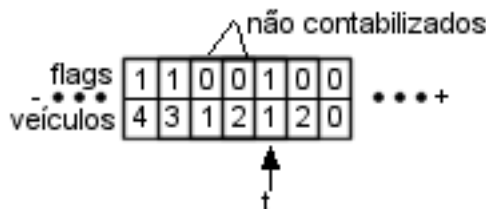
$$\tau = \lceil \frac{100 - (63 + 3 \times 4)}{12} \rceil$$

$$\tau = 3$$

$$\implies q_a(1235 - 3) = q_a(1232),$$

ou seja,  $q_a(1231)$  e  $q_a(1232)$  não foram contabilizados. Para resolver essa lacuna foi adicionado um *flag* a cada posição do vetor de chegadas  $q_a$ . Assim, toda vez que uma posição do vetor é lida marca-se o *flag* desta posição. Feito isso, no mesmo período de amostragem, percorre-se o vetor  $q_a$  em sentido decrescente no tempo verificando se alguma posição não foi contabilizada para recuperar

as informações perdidas. Esse processo continua até que um *flag* positivo seja encontrado. A Figura 6.2 ilustra a existência de duas leituras não contabilizadas que serão adicionadas a  $B(t)$  no instante  $t$ .



**Figura 6.2:** Vetor de chegadas  $q_a$

Nas situações de ausência de filas também se atualiza o vetor de chegadas  $q_a$  de forma a contabilizar os veículos que atravessam o *link* sem interrupções.

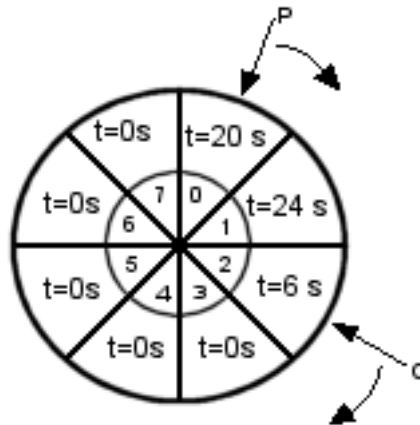
As filas intermediárias ou secundárias, que são aquelas existentes entre a fila principal e a linha de parada, não são efetivamente monitoradas. O que se guarda a respeito delas são os instantes de tempo nos quais elas começaram a se desenvolver. Como a posição da parte final da fila assim como de sua frente avançam sobre a via com velocidade conhecida equivalente ao fluxo de saturação, basta conhecer os instantes de tempo nos quais elas se iniciaram para reconstruir-las.

O método utilizado para guardar esses valores de tempo foi aprimorado visando melhorar a utilização dos recursos computacionais. Ao invés de se utilizar um vetor de grande tamanho, capaz de estocar informação para um dia inteiro por exemplo, aplica-se o conceito de memória circular. Nele, um vetor de tamanho reduzido é gerenciado através de dois ponteiros de posição, indicando o início e o final da região ativa de dados. Esses ponteiros avançam sobre o vetor até encontrar seu fim, e quando o fazem, retornam à primeira posição como pode ser visto na Figura 6.3. Nesta figura, os números de 0 a 7 no círculo interior representam os índices de posição do vetor, e os tempos marcados no círculo exterior representam os tempos de verde ou vermelho. O ponteiro  $P$  indica o início da parte ativa do vetor e o  $C$  seu final. Conforme a dinâmica do sistema os ponteiros são incrementados e se movem em sentido horário.

Para cada aproximação, utiliza-se duas dessas memórias. Uma delas guarda os tempos de vermelho,  $T_{vm}$ , e outra os tempos de verde,  $T_{vd}$ . O seu tamanho baseia-se no número máximo de filas intermediárias que podem coexistir em um determinado *link*.

O ponteiro que aponta para a posição do final da cadeia,  $C_{vm}$  ou  $C_{vd}$ , indica qual o tempo decorrido da fase atual, e o que aponta para o início da cadeia,  $P_{vm}$  ou  $P_{vd}$ , indica o tempo decorrido da fase mais antiga que ainda não foi utilizada. Observando a Figura 6.4, pode-se relacionar as posições dos ponteiros de controle da memória com os tempos de verde e vermelho no gráfico de





**Figura 6.3:** Memória circular

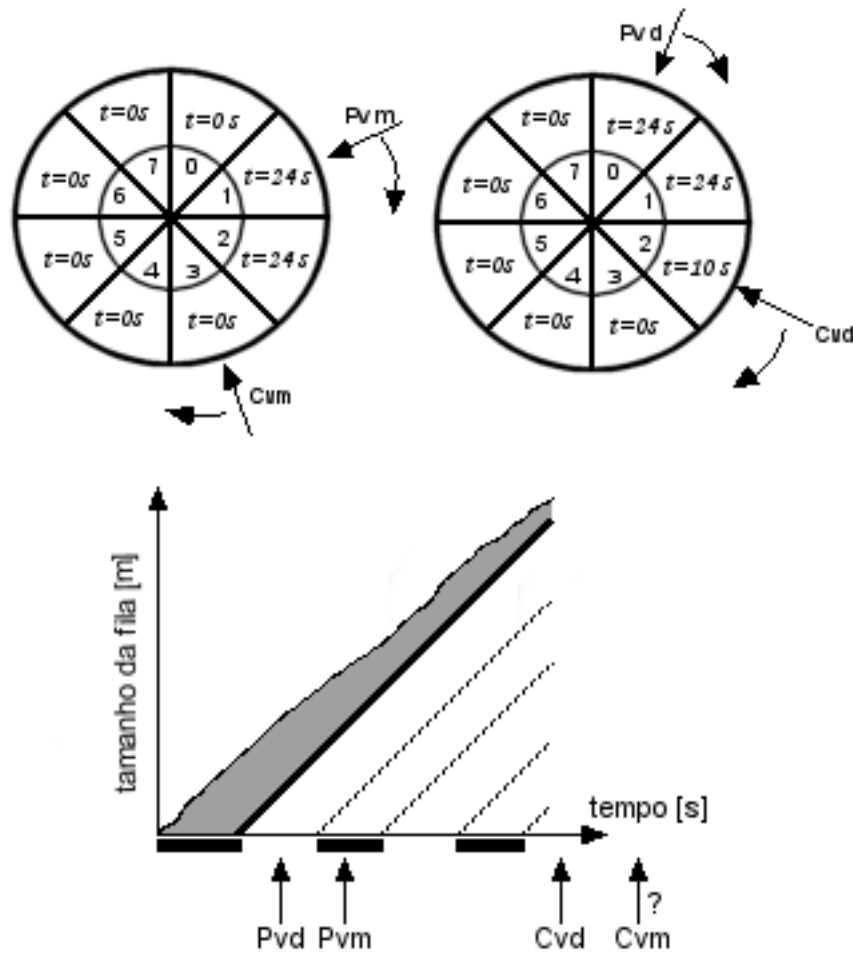
progressão das filas. Neste exemplo, supõe-se que o sistema iniciou-se no tempo zero segundos, e que já ocorreram três vermelhos. No primeiro deles, foi formada a fila principal e por isso a posição inicial do vetor de tempos de vermelho já foi incrementada uma casa. E o último deles, já encerrou, incrementando o ponteiro que aponta para o final do vetor. Em relação aos tempos de verde, dois já ocorreram e o último ainda está vigente.

A cada mudança de vermelho para verde,  $C_{vm}$  é incrementado de uma casa. Se, neste momento a posição da frente da fila  $F$  for zero, ou seja, está situada em cima da linha de parada, o ponteiro  $P_{vm}$  é atualizado e recebe o valor de  $C_{vm}$ .

A cada mudança de verde para vermelho,  $C_{vd}$  é incrementado de uma casa. Quando  $C_{vd}$  e  $P_{vd}$  apontam para a mesma casa significa que não há filas intermediárias. Toda vez que se inicia uma nova fila principal, ou seja,  $B$  avança do zero,  $P_{vd}$  recebe o valor de  $C_{vd}$ .

Uma vez mantido o controle sobre as filas intermediárias pode-se decidir a respeito de como proceder quando a frente da fila principal,  $F$ , encontra o final da mesma,  $B$ :

- Caso  $P_{vd}$  seja igual a  $C_{vd}$ , não há nenhuma fila intermediária e a posição de encontro das duas é guardada em um variável  $Baux$ . Este cenário implica que a fase em verde ainda não se encerrou, e o tratamento de  $Baux$  e do final da fila só será realizado no início do próximo vermelho. Iniciado o vermelho, o final da fila  $B$  é incrementado de acordo com o fluxo de saturação da via, ao passo que  $Baux$  é decrementado a cada amostragem até que se torne nulo, assim como ilustrado no Cenário 2, da Seção 5.2 do Capítulo 5.
- Caso  $P_{vd}$  seja diferente de  $C_{vd}$ , há pelo menos uma fila secundária, e  $B$  recebe o valor calculado (utilizando  $T_{vd}(P_{vd})$ ) de sua posição de final de fila. Se, para este mesmo caso,  $P_{vm}$  for igual a



**Figura 6.4:** Ponteiros de controle

$C_{vm}$ , isto indica que a posição da frente da fila secundária está em zero, então  $F$  recebe o valor zero. Se estes valores forem diferentes,  $F$  recebe também o valor calculado para a posição da frente da fila (utilizando  $T_{vd}(P_{vd})$  e  $T_{vm}(P_{vm})$ ). Mais detalhes a respeito destes cálculos podem ser vistos no Cenário 3, da Seção 5.2 do Capítulo 5. Terminado os cálculos os ponteiros  $P_{vd}$  e  $P_{vm}$  são incrementados.

Primeiramente, o modelo foi implementado em *Matlab* de modo a fazer a verificação de erros. Após esta etapa, uma versão em *C++* foi implementada para rodar acoplada a um simulador de tráfego.

Essa mesma técnica de memória circular pode ser aplicada às outras variáveis possibilitando ao modelo um uso indeterminado no tempo. Como a implementação do modelo visava apenas a simulação, não foi feita nenhuma alteração em relação ao modo de armazenagem das outras variáveis.

Toda implementação foi voltada à operação em tempo real. Isto implicou em rotinas capazes

de lidar com a falta de informação concreta a respeito do futuro. Por exemplo, nos casos de fila única que se extingue durante a fase de verde, há que se guardar o último estado do sistema até que o vermelho ocorra, para então, tratar a questão do número de veículos que foram capazes de cruzar a linha de parada. Além disso, o tempo de amostragem pode ser regulado, alterando-se apenas um parâmetro, de forma a tornar-se compatível com o sistema de controle candidato.

## 6.2 Resultados de Simulação

Terminada a concepção do modelo e sua implementação passa-se à fase de testes em busca de resultados. O cenário escolhido para a simulação foi uma via de 500 metros de comprimento, grande o suficiente para que pudesse ser observado a formação de filas secundárias. Esta possui um fluxo de saturação de  $1800\text{veic}/h$  e velocidade de cruzeiro de  $57,6\text{km}/h$  ou  $16\text{m}/s$ . O ciclo escolhido foi de  $30s$  com um *split* de 50%, ou seja,  $15s$  para cada fase. Os valores escolhidos estão dentro de uma faixa considerada real, porém não refletem os parâmetros de alguma via específica.

O simulador utilizado foi um programa de micro-simulação de tráfego, Sitra B+ [23]. Este simulador trabalha com simulação microscópica, ou seja, cada veículo é modelado individualmente e tem comportamento próprio. A interação entre os veículos se baseia em uma lei de perseguição, onde cada veículo procura se mover à velocidade de cruzeiro da via, porém, limitado pela velocidade do veículo da frente. Ou seja, se um veículo diminuir a velocidade, aqueles que estão atrás também a diminuirão de acordo com a distância entre os mesmos. Além disso, alguns parâmetros como agressividade do motorista, aceleração e desaceleração máxima do veículo, comprimento do mesmo, entre outros, podem ser determinados.

Este simulador pode ser comandado por um programa externo e a comunicação entre eles é feita através de arquivos de texto contendo as diretrizes para o próximo passo de simulação. O programa utilizado foi desenvolvido em  $C++$  e permite ao operador regular os tempos de verde e vermelho, além de extrair dados correntes da simulação para uso posterior.

Como o simulador não disponibiliza nem modela as filas e seus estados, ou seja, a existência delas é apenas um resultado do modelo dinâmico do simulador, a única forma de se comparar o que está acontecendo na simulação e o que o modelo dinâmico de filas prevê é através de uma análise visual e do número de veículos presentes no *link*, dado que é fornecido pelos dois sistemas.

A seguir são apresentadas duas análises sobre o mesmo cenário proposto. A primeira delas, Malha 1, ilustra um caso típico onde há apenas um detector veicular situado na entrada do *link* monitorando a chegada de veículos. A segunda delas, Malha 2, trabalha com um detector adicional na saída

Cenário 1	0 - 1000 [s]	1200 [veic/h]
	1001-3000 [s]	900 [veic/h]

Cenário 2	0 - 1000 [s]	1200 [veic/h]
	1001 - 2000 [s]	450 [veic/h]
	2001 - 2500 [s]	900 [veic/h]
	2501 - 3000 [s]	1200 [veic/h]

**Tabela 6.1:** *Cenários de Simulação*

do *link* efetuando a contagem dos veículos que o deixam. Esta segunda tem por objetivo destacar as vantagens da monitoração da saída da aproximação.

O período de amostragem escolhido foi de 1s e como maneira de se observar transitórios e o desempenho do modelo frente às oscilações do tráfego optou-se por simular dois cenários diferentes.

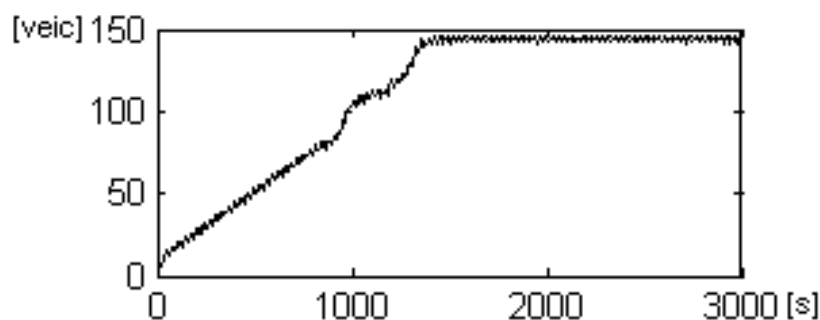
O primeiro cenário imprime ao sistema duas demandas diferentes ao longo do tempo. Para os primeiros 1000 segundos é dado uma carga de 1200veic/h lembrando que a capacidade efetiva da aproximação passa a ser de 900veic/h devido ao tempo de vermelho, ou seja, uma carga acima da capacidade com o objetivo de congestionar todo o *link*. Após esse período, reduz-se a demanda à capacidade real da aproximação, ou seja, os 900veic/h. Este cenário tem por objetivo forçar o surgimento de filas secundárias e verificar a resposta do sistema quando se diminui a carga até a capacidade do sistema.

O segundo cenário possui quatro demandas diferentes. Aos primeiros 1000s impõe-se uma carga de 1200veic/h, depois uma carga de 450veic/h nos próximos 1000s, uma carga de 900veic/h nos seguintes 500s e a seguir 1200veic/h nos últimos 500s. Este cenário tem por objetivo testar os transitórios do sistema e verificar seu desempenho. Ambos os cenários foram resumidos na Tabela 6.1.

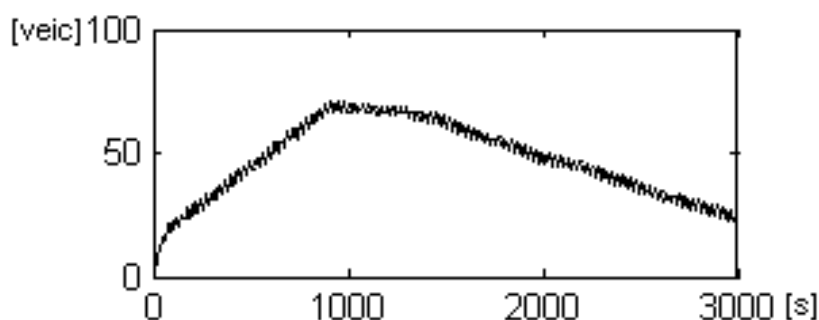
### 6.2.1 Malha 1

Os resultados obtidos com a simulação do Cenário 1 podem ser visualizados nas Figuras 6.5, 6.6 e 6.7. Através desta simulação já é possível identificar um dos problemas decorrentes de uma especificação de parâmetros incorreta ou equivocada. Assim como apresentado na seção anterior, a simulação inicia com uma demanda acima da capacidade do cruzamento, causando congestionamento, e depois esta demanda é reduzida à capacidade do mesmo. Analisando as condições im-

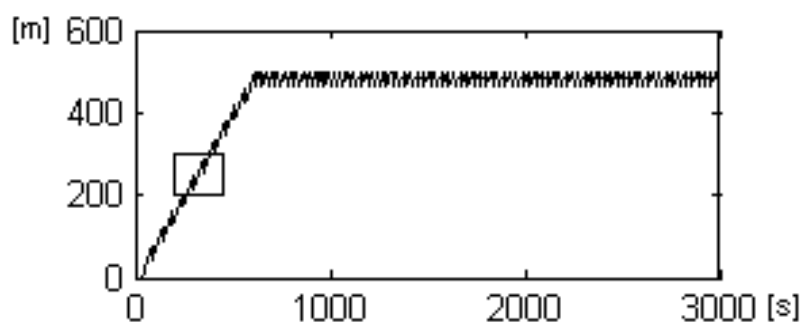
postas à simulação, constata-se que na realidade o modelo se comporta de maneira esperada, pois não há como escoar o fluxo acima da capacidade do cruzamento. Revisando os dados fornecidos pela simulação, foi possível verificar que o simulador não respeitou o fluxo de saturação, ou seja, ele permitiu um escoamento maior do que o estipulado, proporcionando uma diminuição progressiva da fila.



**Figura 6.5:** Malha 1 - Cenário 1 - Número de veículos no link dado pelo Modelo Proposto

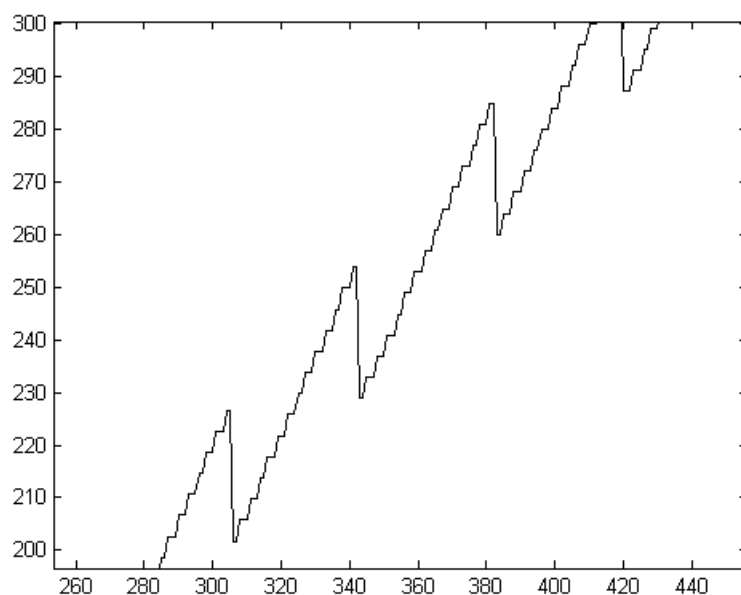


**Figura 6.6:** Malha 1 - Cenário 1 - Número de veículos no link dado pelo Sitra



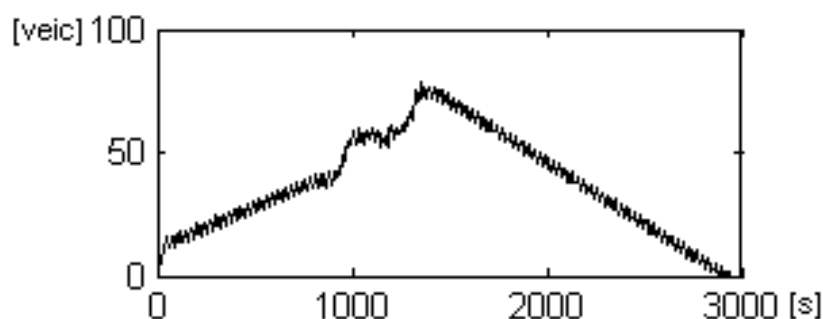
**Figura 6.7:** Malha 1 - Cenário 1 - Posição do final da fila principal B

Para verificar esta hipótese, foi alterado o valor do fluxo de saturação do modelo em busca de uma melhora da previsão de filas. O resultado desta “sintonia” pode ser visto nas Figuras 6.9, 6.10 e 6.11. O fluxo de saturação do modelo foi aumentado de 900 veic/h para 1080 veic/h, e um comportamento mais condizente foi obtido.



**Figura 6.8:** Detalhe aumentado da Figura 6.7

A Figura 6.8 mostra em detalhe a característica de dente de serra da evolução da posição do final da fila principal, *B*, destacado na Figura 6.7.

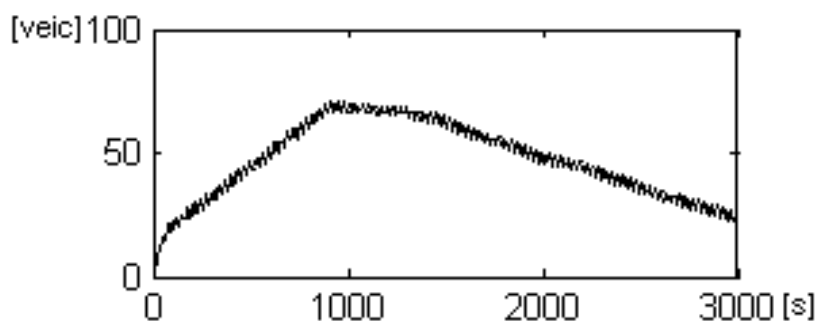


**Figura 6.9:** Malha 1 - Cenário 1 - Número de veículos no link dado pelo Modelo Proposto, com fluxo de saturação alterado para 0.6veic/s

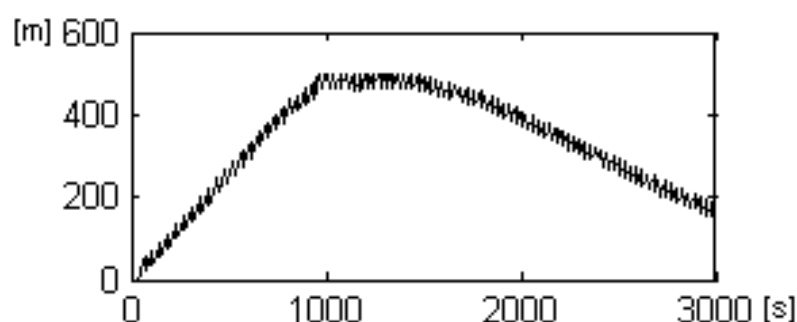
Para o Cenário 2, o fluxo de saturação foi alterado para seu valor original de 900 veic/s. Os resultados são mostrados nas Figuras 6.12, 6.13 e 6.14. Nota-se que o problema ocorrido anteriormente não se repetiu pois agora a resposta do modelo é bastante próxima ao que ocorreu de fato na simulação.

### 6.2.2 Malha 2

As alterações necessárias para a implementação da Malha 2 se resumem à colocação de mais um sensor na saída do *link* no modelo do simulador e na modificação da lógica de descarga de filas

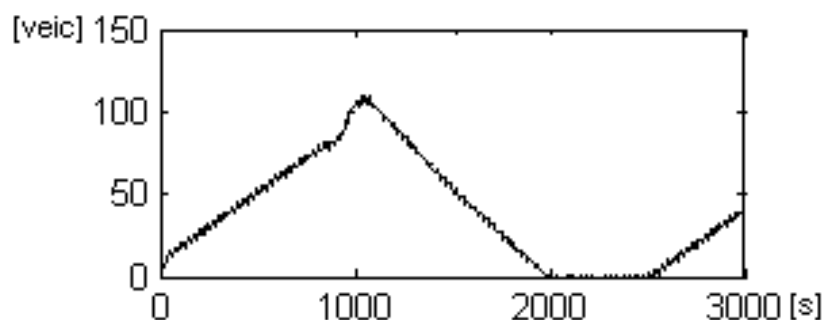


**Figura 6.10:** Malha 1 - Cenário 1 - Número de veículos no link dado pelo Sitra

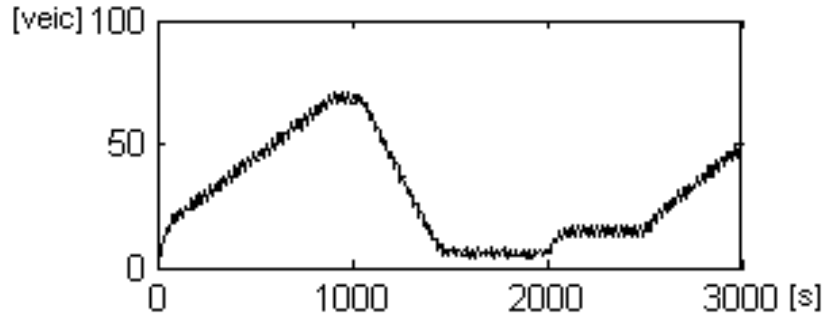


**Figura 6.11:** Malha 1 - Cenário 1 - Posição do final da fila principal B, com fluxo de saturação alterado para 0.6veic/s

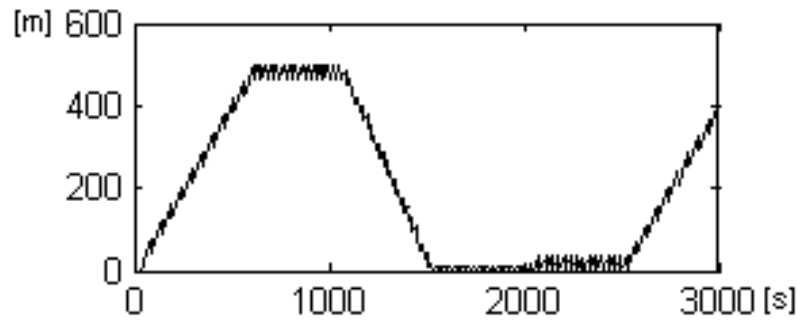
para o modelo proposto. Em comparação ao que era feito antes, alterou-se a dinâmica da frente da fila,  $F(t)$ , e também a contagem do tempo de verde corrente. Nos casos onde há somente a fila principal, a frente da fila,  $F(t)$ , evolui de acordo com a leitura do sensor posicionado na saída do *link*, ou seja, a cada veículo detectado um veículo é descontado da fila. Para os casos onde há uma ou mais filas secundárias mantém-se a contagem do tempo de verde a cada amostragem, e utiliza-se a informação advinda do sensor a jusante para efetuar uma correção dessa contagem. Como o histórico das filas secundárias é armazenado na forma de tempos de verde e vermelho, a correção aplicada também se faz na forma de tempo. Sendo a progressão das filas baseada no fluxo de saturação e no tempo de



**Figura 6.12:** Malha 1 - Cenário 2 - Número de veículos no link dado pelo Modelo Proposto



**Figura 6.13:** Malha 1 - Cenário 2 - Número de veículos no link dado pelo Sitra



**Figura 6.14:** Malha 1 - Cenário 2 - Posição do final da fila principal B

amostragem, converte-se a descarga de um veículo na forma de tempo:

$$t_{extra} = \lceil \frac{q_d}{q_s \times \tau} \rceil, \quad (6.3)$$

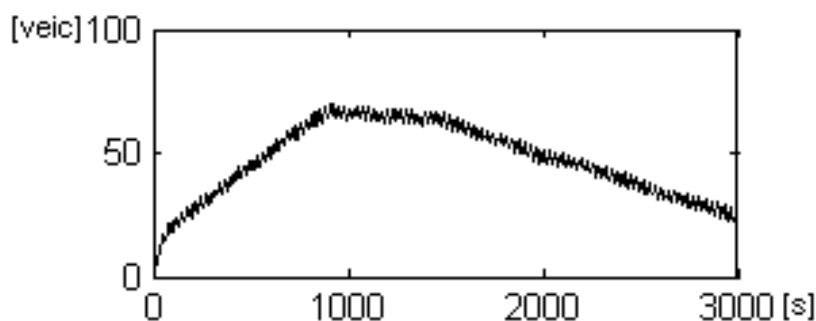
ou seja, quantos períodos seriam necessários para descarregar um determinado número de veículos. No caso onde o fluxo de saturação é de  $0.5[\text{veic}/s]$  o tempo de amostragem de  $1[s]$ , a descarga de dois veículos significaria um incremento de 4 unidades no tempo de verde corrente.

$$\Rightarrow t_{extra} = \lceil \frac{2}{0.5 \times 1} \rceil = 4$$

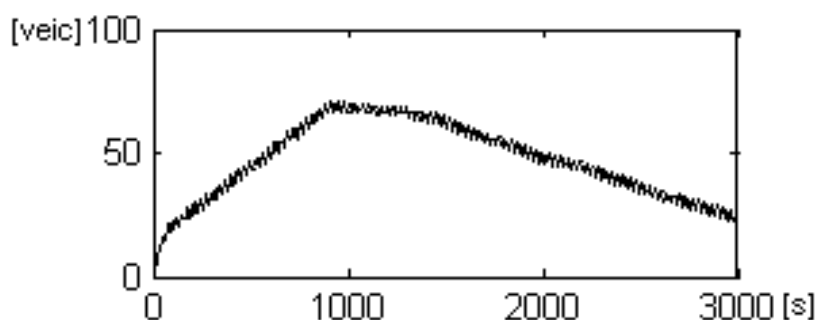
Simulando novamente o Cenário 1, agora para a Malha 2, observa-se através das Figuras 6.15, 6.16 e 6.17 que o modelo respondeu muito bem às condições impostas e que o problema detectado anteriormente foi sanado devido ao fato de se ter na Malha 2 um controle do número de veículos que deixam o *link*.

Também para o Cenário 2, o modelo responde muito bem às oscilações de demanda como pode ser visto nas Figuras 6.18, 6.19 e 6.20. Um fato que deve ser ressaltado é o de que a posição do final da fila principal dado pelo modelo, ocorre, no tempo, antes do real, devido à parada e aceleração dos veículos não ser instantânea. Embora isto implique num erro de estimação, não atrapalha a dinâmica,





**Figura 6.15:** Malha 2 - Cenário 1 - Número de veículos no link dado pelo Modelo Proposto

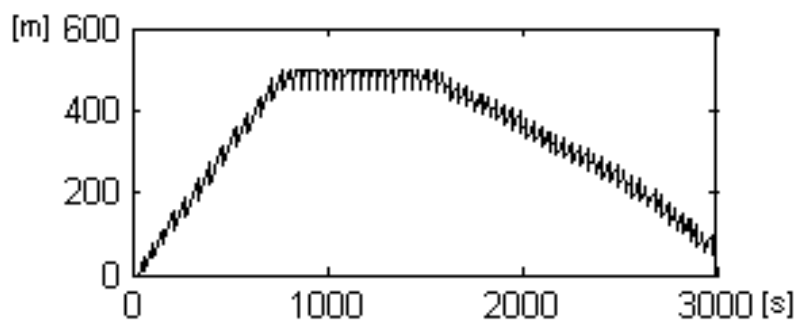


**Figura 6.16:** Malha 2 - Cenário 1 - Número de veículos no link dado pelo Sitra

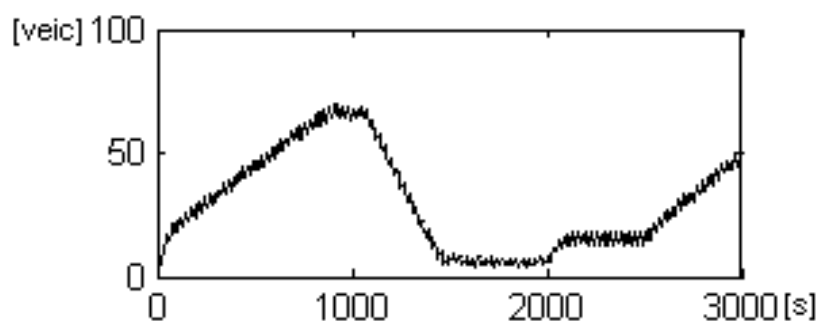
pois um veículo com velocidade reduzida, também funciona como uma barreira à passagem de outros veículos, levando a um resultado equivalente. Este comportamento, também leva a formação de um número maior de filas intermediárias, porém não distorce os dados, já que o que se busca é manter a contagem do atraso.

### 6.3 Conclusão

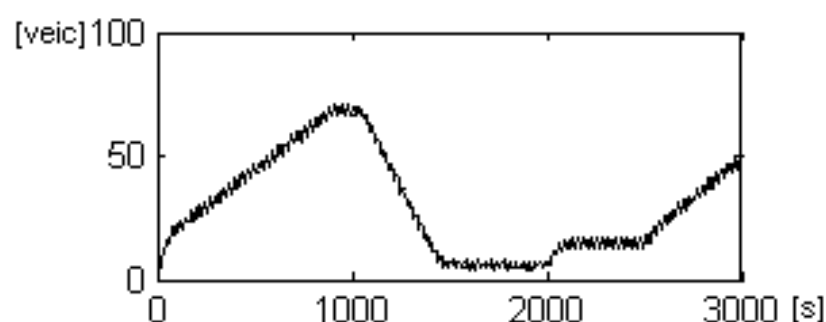
Este capítulo apresentou alguns detalhes da implementação do modelo proposto seguido dos resultados de simulação. Estes resultados destacam uma grande falha nos modelos de fila, que é a



**Figura 6.17:** Malha 2 - Cenário 1 - Posição do final da fila principal B



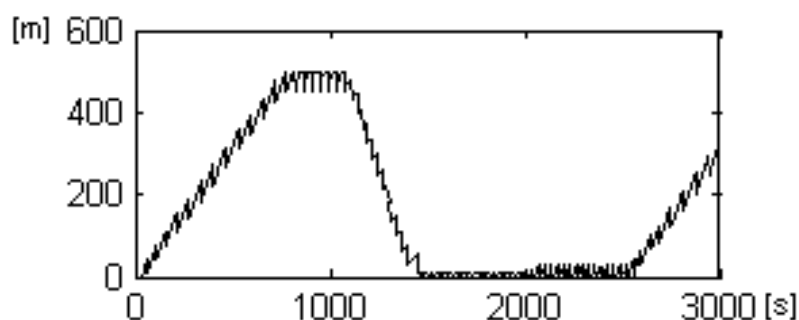
**Figura 6.18:** Malha 2 - Cenário 2 - Número de veículos no link dado pelo Modelo Proposto



**Figura 6.19:** Malha 2 - Cenário 2 - Número de veículos no link dado pelo Sitra

incapacidade de fornecer o estado real das filas quando estão mal calibrados ou quando algo imprevisto ocorre, como por exemplo, um acidente. Apesar de se poder realimentar o sistema, colocando um sensor extra na saída do *link*, ainda restam as incertezas a respeito dos veículos que possivelmente possam deixar ou entrar na via através de garagens ou acessos não monitorados. Mesmo com essas limitações, que estão presentes na maioria dos outros sistemas, o modelo proposto apresentou um bom resultado, sendo capaz de estimar a posição real do final da fila principal, que é um dado importante para a realização de coordenação de verdes em uma via arterial.

O próximo capítulo conclui o estudo desta dissertação e trata de algumas perspectivas e soluções alternativas para a estimação de filas.



**Figura 6.20:** Malha 2 - Cenário 2 - Posição do final da fila principal B

## Capítulo 7

# Conclusões e Perspectivas

Este trabalho propôs-se a descrever, através de um modelo, o fenômeno de filas múltiplas de forma a melhorar a qualidade da informação repassada por sensores de laço indutivo, para a estimação de filas em controle de tráfego em tempo real.

Sistemas avançados de detecção veicular já se encontram no mercado e oferecem qualidade e confiabilidade maior que os laços indutivos. Dentre estes sistemas estão os que utilizam o reconhecimento de imagens para determinar o número de veículos em uma aproximação e aqueles que ainda utilizam a teoria eletromagnética da física, assim como os laços indutivos. Estes, apesar de incapazes de fornecer informações a respeito das filas se sobressaem em relação aos de laço indutivo por dispensarem o uso de fios sobre o pavimento, fato que torna o sistema suscetível a rupturas e mau funcionamento, além de serem capazes de diferenciar caminhões, carros e motocicletas. Apesar das vantagens desses novos sistemas, o laço indutivo continua sendo uma solução boa e barata.

O modelo proposto, apesar de ainda sofrer, assim como todos os outros modelos, com as incertezas do sistema referentes a rotas tomadas pelos veículos e existência de vias secundárias nos *links*, ele consegue fornecer uma boa estimativa do que realmente se passa na via. O fato de ele já fornecer a posição real do final da fila principal, ou seja, aquele aglomerado de veículos que serve de barreira para a entrada de novos veículos na aproximação, assim como o atraso, permite um melhor controle quando se deseja realizar coordenação semafórica, além de melhorar a informação em situações de congestionamento. Vale destacar também, que este modelo pode ser utilizado em qualquer dos sistemas de controle em tempo real apresentados, bastando realizar um acoplamento e tradução das variáveis utilizadas.

O que falta ao modelo, para torná-lo um produto mais confiável, seria o tratamento estocástico do sistema. Para isso seria necessário aplicar o que normalmente se conhece como filtro, ou seja,

---

através de um processo separado baseado em uma distribuição de probabilidades calcula-se a chance de um determinado veículo encontrar o final da fila em determinado instante de tempo, além da chance deste veículo cruzar a linha de parada. Este tipo de filtro pode ser encontrado em [10] e [1].

Nota-se, ao ler este documento, que em momento algum tratou-se o tempo de amarelo no desenvolvimento do modelo proposto. Uma das razões foi a ausência de diferenciação por parte do simulador entre vermelho e amarelo. No simulador utilizado, a reação dos veículos ao amarelo é exatamente igual ao vermelho, ou seja, todos eles param quando começa o amarelo. Devido a este comportamento, o tempo de amarelo é nulo nas simulações. Porém, isto não tira a validade do modelo, porque a adição do amarelo nos cálculos pode ser feita de maneira muito simples. O amarelo seria processado da mesma maneira que o verde, só que seria dado um desconto no tempo, pois este não é utilizado integralmente como o verde (já descontando o tempo perdido).

O objetivo deste estudo foi alcançado com êxito. O ponto principal era entender a dinâmica das filas e reconhecer que a estimação das mesmas trata-se de um problema, ou seja, não é algo trivial. Mesmo o mais complexo e completo modelo de tráfego não é capaz de determinar filas e conversões com exatidão, quando não há informação suficiente à disposição. Pode-se dizer também que este trabalho contribui, mesmo que pouco, com os estudos nesta área visto que o modelo proposto é capaz de fornecer um tipo de informação que antes não era alcançada diretamente, ou seja, a posição real do final da fila, dado muito importante para a coordenação semafórica.

## Apêndice A

# Código fonte em linguagem Matlab

```
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%Filas Horizontais%%
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

clear all;
%close all;

%Número de iterações
iter=4000;

%Gera semáforo
ciclo=24; for t=1:iter
    if mod(t,ciclo) <= ciclo/2+1
        m(t)=1;
    else
        m(t)=0;
    end
end

%Período de amostragem [s]
T=1;
```

---

```

%Comprimento médio do veículo [m]
lv=4;

%Velocidade de cruzeiro [m/s]
Vc=16*T;

%Distância entre o sensor e a linha de parada [m]
L=500;

%Fluxo de saturação da via [veículo/s]
s=.5*T;

%Gera carros, a cada T
for t=1:3:1000
    q(t,1)=1;
end for t=1001:4:iter+1
    q(t,1)=1;
end

q(:,2)=0;%indica se o veículo foi contabilizado ou não

%Inicialização dos vetores
ti=ceil(L/Vc); F(1:iter)=0;
B(1:iter)=0;%B(1:37)=40;

Baux=0; Baux2=0; Nonda=20; Tvd(1:Nonda)=0; Tvm(1:Nonda)=0; Pvd=1;
Pvm=1; Cvd=1; Cvm=1; tvdi=1;tvdf=1;tvmi=1;tvmf=1; Vaux(1:iter)=0;

%Loop
for t=ti+1:iter

    tau=ceil( (L-B(t-1)) / Vc );
    B(t)=B(t-1);

    if F(t-1)~=0
        F(t)=F(t-1) + s*lv;
    end
end

```

---

```

end

if m(t)==1 & m(t-1)==0
    Cvm=Cvm+1;
    if Cvm > Nonda
        Cvm = 1;
    end
    Tvm(Cvm)=0;
    if F(t)==0
        Pvm=Cvm;
    end
end

end

if m(t)==0 & m(t-1)==1
    Vaux(t)=0;
    Cvd=Cvd+1;
    if Cvd > Nonda
        Cvd = 1;
    end
    Tvd(Cvd)=0;
    if Baux~=0
        if (Pvd-1)<1
            Taux=Nonda;
        else
            Taux=Pvd-1;
        end
        if s*lv*Tvd(Taux)*(Vc/(Vc+s*lv)) < Baux
            Baux = (Baux - s*lv*Tvd(Taux)*(Vc/(Vc+s*lv)));
            Baux = floor(Baux/lv)*lv;
        else
            Baux=0;
        end
        Tvd(Taux)=0;
    end
end

end

```

---

```

if tau>=0
    if q(t-tau,2)==0 & B(t)~=0 & B(t)<L    %veículo não contabilizado
        B(t)=B(t)+q(t-tau,1)*lv;           %adiciona veículo à fila se detectado
        q(t-tau,2)=1;                     %contabiliza veículo
        for i=t-tau-1:-1:1                 %adiciona os veículos que eventualmente
            if q(i,2)==0                   % foram pulados
                B(t)=B(t)+q(i,1)*lv;
                q(i,2)=1;
            else
                break;
            end
        end
    end
else
    if q(t-tau,2)==0 & m(t)==0 & B(t)==0
        B(t)=B(t)+q(t-tau,1)*lv;
        q(t-tau,2)=1;
        for i=t-tau-1:-1:1
            if q(i,2)==0 & m(t)==0
                B(t)=B(t)+q(i,1)*lv;
                q(i,2)=1;
            else
                break;
            end
        end
    end
    %%%%%%%%%
    Pvd=Cvd;
    %%%%%%%%%
else
    if q(t-tau,2)==0 & m(t)==1 & B(t)==0
        q(t-tau,2)=1;
        for i=t-tau-1:-1:1    %adiciona os veículos que
            if q(i,2)==0      % eventualmente foram pulados

```



```

                                q(i,2)=1;
                        else
                                break;
                        end
                end
        end
end
end
end
end

if B(t)>L                    %a fila não pode ultrapassar o sensor
    B(t)=L;
end

if m(t)==0 & m(t-1)==0 & Baux>0
    Baux=Baux-s*lv;
    B(t)=B(t)+s*lv;
end

if m(t)==1
    Tvd(Cvd)=Tvd(Cvd)+1;
else
    Tvm(Cvm)=Tvm(Cvm)+1;
end

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
if Vaux(t-1)~=0
    Vaux(t)=s*lv + Vaux(t-1);
end

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
if m(t)==1 & m(t-1)==1 & m(t-2)==0
    if B(t)~=0 & F(t)==0
        F(t)=s*lv;
    end
    Vaux(t)=s*lv;%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

```

---

```

end

K(t)=F(t);%%%
Z(t)=B(t);%%%

if F(t)>=B(t)    & F(t) ~ =0
    if Pvd==Cvd
        Baux=B(t);
        F(t)=0;
        B(t)=0;
    else
        if Tvd(Pvd) ~ =0
            B(t)=B(t)-s*lv*Tvd(Pvd)*(Vc/(Vc+s*lv));%F(t-Tvd(Pvd))
            if B(t)<0
                B(t)=0;
            end
            if Pvm~=Cvm
                F(t)=F(t-Tvm(Pvm)-Tvd(Pvd));%B(t)-s*lv*Tvm(Pvm);
                if F(t)<0
                    F(t)=0;
                end
            else
                F(t)=0;
            end
            Tvd(Pvd)=0;
            Tvm(Pvm)=0;
            Pvm=Pvm+1;
            if Pvm>Nonda
                Pvm=1;
            end
        else
            end
        end
    end
end

```

---

```
Pvd=Pvd+1;
if Pvd>Nonda
    Pvd=1;
end
end

end t=1:iter;
plot(t,B(t),'k');% ,t,F(t),'k');% ,t,m(t),t,K(t),t,Z(t));% ,t,Vaux(t));
```

# Referências Bibliográficas

- [1] J.S. Baras, W.S. Levine e T.L. Lin, Discrete-Time Point Process in Urban Traffic Queue Estimation, IEEE Transactions on Automatic Control, Vol. AC-24, No. 1, Feb. 1979, pp. 13 – 26.
- [2] J.S. Baras, A.J. Dorsey e W.S. Levine, Estimation of Traffic Platoon Structure from Headway Statistics, IEEE Transactions on Automatic Control, Vol. AC-24, No. 4, Aug. 1979, pp. 533 – 559.
- [3] R. M. Brito, Desenvolvimento de um Simulador para Análise e Projeto de Sistemas de Controle de Tráfego em Malha Fechada, Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, Departamento de Automação e Sistemas, 1998.
- [4] I. Day, SCOOT - Split, Cycle Offset Optimization Technique, Transportation Research Board, TRB Committee A3A18 Traffic Signal Systems, TRB Mid-Year Meeting, Adaptive Traffic Signal Control Workshop, Jul. 12 – 14, 1998.
- [5] P. Dell’Olmo e P. B. Mirchandani, REALBAND: an approach for real-time coordination for traffic flows on a network, Transport Res. 1494, 1995, pp. 106-116.
- [6] C. Diakaki, Integrated Control of Traffic Flow in Corridor Networks, Doctor’s Thesis, Technical University of Crete, Chania, Department of Production Engineering and Management, 1999.
- [7] C. Diakaki, V. Dinopoulou, K. Aboudolas, M. Papageorgiou, E. Ben-Shabat, E. Seider, A. Leibov, Extensions and New Applications of the Traffic Signal Control Strategy TUC, Transportation Research Board Annual Meeting, 2003.
- [8] J.L. Farges, I. Kamdem e J.B. Lesort, “Realization and Test of a Prototype for Real Time Urban Traffic Control”, Project Number V 1022, 1991.
- [9] J.L. Farges, L. Khoudour e J.B. Lesort, Prodyn: On Site Evaluation, CERT/DERA, INRETS, France, pp.62-66, 1990.

- 
- [10] J.L. Gallego, J.L. Farges e J.J. Henry, Traffic Queue Estimation, Sociedad de Estadística e Investigación Operativa, Vol. 5, No.1, 1997, pp. 81 – 93.
  - [11] N.H. Gartner, F.J. Pooran e C.M. Andrews, Implementation of the OPAC Adaptive Control Strategy in a Traffic Signal Network, IEEE Intelligent Transportation Systems Conference Proceedings, Oakland, CA, 2001, pp. 195 – 200.
  - [12] D. C. Gazis, Traffic Theory, Kluwer Academic Publishers, Boston/Dordrecht/London, 2002.
  - [13] D. C. Gazis e R. B. Potts, The oversaturated intersection, *Proceedings of the second international symposium on traffic theory*, London, Reino Unido, pp. 221-237, 1963.
  - [14] D.L. Gerlough e M.J. Huber, Traffic Flow Theory, National Research Council, Special Report 165, Washington, D.C., 1975.
  - [15] How SCOOT Works, [http://www.dft.gov.uk/stellent/groups/dft\\_roads/documents/page/dft\\_roads\\_504797-04.hcsp](http://www.dft.gov.uk/stellent/groups/dft_roads/documents/page/dft_roads_504797-04.hcsp), Ago. 2005.
  - [16] M. H. Lighthill e G. B. Whitham, On Kinematic Waves II A Theory of Traffic Flow on Long Crowded Roads, Proceedings of the Royal Society, Series A, London, 10 de Maio de 1955.
  - [17] Manual de Semáforos, Serviços de Engenharia, Departamento Nacional de Trânsito, Brasília, D.F., 1979.
  - [18] S.H. Ming, Uma Breve Descrição do Sistema SCOOT, Notas Técnicas, Companhia de Engenharia de Tráfego, NT201, 1997.
  - [19] P. Mirchandani e L. Head, A Real-Time Traffic Signal Control System: Architecture, Algorithms and Analysis, Transportation Research Part C9, 2001, pp. 415 – 432.
  - [20] C. Mystkowski e S. Khan, “Estimating Queue Lengths Using SIGNAL94, SYNCHRO3, TRANSYT-7F”, 78<sup>th</sup> Transportation Research Board Annual Meeting, Nov. 1998.
  - [21] S. Sen e K. L. Head, Controlled Optimization of Phases at an Intersection, Transport Science 31, pp. 5-17, 1997.
  - [22] Siemens Traffic, <http://www.siemenstraffic.com>, Ago. 2005.
  - [23] SODIT(Société pour le Développement de l’Innovation dans les Transports), Manuel Utilisateur Logiciel Sitra, Mar., 2002.
  - [24] G. Stephanopoulos, P.G. Michalopoulos e G. Stephanopoulos, Modelling and Analysis of Traffic Queue Dynamics at Signalized Intersections, Transpn Res.-A, Vol. 13A, 1979, pp. 295 – 307.

- [25] F. V. Webster, Traffic Signal Settings, Road Research Laboratory, Technical Paper No. 39, London, 1958.